



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**PROBLEMATIKA KRITICKÉHO ZÚŽENÍ STĚNY U  
VYSOKOTLAKÉHO TVÁŘENÍ KAPALINOU**

PROBLEMS OF CRITICAL WALL NARROWING IN HIGH PRESSURE HYDROFORMING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jan Drška

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.

BRNO 2020

# Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jan Drška**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Lidmila, CSc.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Problematika kritického zúžení stěny u vysokotlakého tváření kapalinou

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hydroformování je metoda plošného tváření u které je konvenční nástroj nahrazen kapalinou. V porovnání s konvenčním tvářením, umožňuje využití kapalného media dosažení složitých tvarů výlisků při sníženém počtu tvářecích operací. Hydroformování, které se využívá k přetváření plechů a trubek, má však stejně jako každá technologie své limity. Při sestavování technologických postupů výroby je třeba tyto mezní stavy přetvoření respektovat.

### Cíle bakalářské práce:

- Zhodnotit technologičnost řešené součásti.
- Analyzovat možné způsoby výroby řešené součásti se zhodnocením jejich vhodnosti.
- Vybrat optimální technologii výroby a pro zvolenou výrobní technologii zpracovat literární studii.
- Predikovat nebezpečí kritického zúžení stěny výlisku.
- Sestavit technologický postup výroby doložený nezbytnými technologickými výpočty.
- Zpracovat technicko–ekonomické zhodnocení navrženého řešení.

### Seznam doporučené literatury:

MARCINIAK, Zdislaw, J.L. DUNCAN and S.J. HU. Mechanics of Sheet Metal Forming. 2.ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 2002. 211 s. ISBN 07-506-5300-00.

HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press. 2007. 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2006. 217 s. ISBN 80-214-2374-9.

SAMEK, Radko a Eva ŠMEHL9KOVÁ. Speciální technologie tváření, část I. Brno: Akademické vydavatelství CERM, s. r. o., 2010. 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

DRŠKA Jan: Problematika kritického zúžení stěny u vysokotlakého tváření kapalinou

---

Bakalářská práce se zabývá zúžením stěny plechu při tváření kapalinou na příkladu z praxe. V této práci je převzatá problematika z praxe a je zde vyzkoušena nestandardní problematika řešení. Teoretická část nastiňuje klasické metody hydroformingu a teorie plošného tváření materiálu. V praktické části je vypracován návrh řešení, a i provedená simulace. Následně je popsán i ideální stroj pro hydroforming a technologický postup. Poslední část je věnována technickému a ekonomickému zhodnocení.

**Klíčová slova:** Numerická simulace, Hydroforming, PAM-STAMP, zúžení stěny, tváření kapalinou

## ABSTRACT

DRŠKA Jan: Problems of critical wall narrowing in high pressure hydroforming

---

Bachelor's thesis deals with narrowing metal sheet wall by high-pressure-fluid forming technology on a practical example. This thesis is working on an issue from practice while using a non-standard problem solving method. Theoretical part outlines classical methods of hydroforming and the theories of sheet metal forming. Practical part consists of proposed solution and an elaborated simulation. Subsequently is described the ideal machine for hydroforming and technological procedure. Last part is devoted to technical and economical evaluation.

**Key words:** Numerical simulation, Hydroforming, PAM-STAMP, wall narrowing, forming by fluid

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

DRŠKA, Jan. *Problematika kritického zúžení stěny u vysokotlakého tváření kapalinou* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132197>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Zdeněk Lidmila.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „*Problematika kritického zúžení stěny u vysokotlakého tváření kapalinou*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

..... V Brně dne 21.5.2021 .....

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Lidmilovi, CSc. za cenné připomínky a vedení práce a Ing. Janu Řiháčkovi, Ph.D. za pomoc se simulačním programem PAM – STAMP.

## Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Rozbor zadání.....</b>	<b>10</b>
1.1 Výrobní možnosti, metody řešení .....	11
<b>2 Technologie tváření kapalinou .....</b>	<b>14</b>
2.1 Metoda Hydroform .....	15
2.2 Metoda Wheelon .....	16
2.3 Metoda Flexform .....	17
2.4 Metoda Hydromechanického tažení .....	18
<b>3 Tvařitelnost materiálu při plošném tváření.....</b>	<b>20</b>
3.1 Anizotropie .....	20
3.2 Exponent deformačního zpevnění $n$ .....	22
3.3 Rozbor stavu napjatosti.....	23
3.4 Zkouška tahem .....	24
3.5 Diagram mezní tvařitelnosti.....	26
3.6 Povrchové vady.....	28
<b>4 Analýza Problému .....</b>	<b>29</b>
<b>5 Volba stroje.....</b>	<b>39</b>
<b>6 Technologický postup .....</b>	<b>40</b>
<b>7 Technicko-Ekonomické zhodnocení .....</b>	<b>42</b>
<b>Závěr .....</b>	<b>43</b>

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

Seznam použitých obrázků

Seznam použitých tabulek



## ÚVOD [1], [2]

Každá technologie má svoje výhody i nevýhody a každá technologie nám otevírá nové možnosti zpracování materiálů. Například u obrábění je nevýhoda vysoká cena na provoz a velké množství odpadního materiálu. Požadovaný tvar se musí doslova vyřezat z polotovaru. U tvářecích plošných technologií se jako polotovar využívá plech nebo pásovina, ze které se vytvoří požadovaný tvar a ke konci se případně odstraní přebytky.

Technologie vysokotlakého tváření kapalinou (dále jen hydroforming) je nekonvenční technologie při které je tažník nebo tažnice nahrazen kapalinou. Díky tomuto způsobu lze vytvářet velmi složité tvary, které by nešly vytvořit klasickým pevným nástrojem například tváření trubek nebo karoserií pro automobilový průmysl viz obrázek 1.

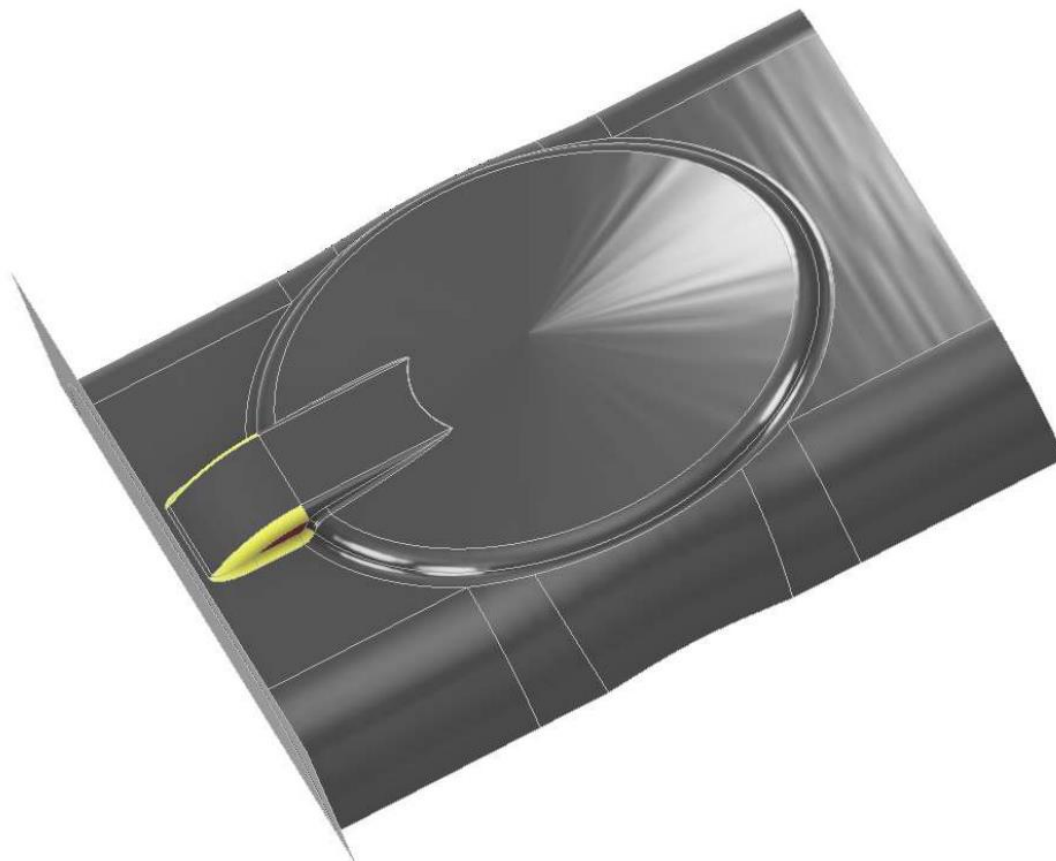


*Obrázek 1 Příklad výrobků tvářených kapalinou [1][2]*

## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [4],[5],[6],[10],[16]

Řešeným dílem je mycí prostor u myčky nádobí. V současné době je díl vyráběn technologií hydroformování, kde u některých kusů dochází ke vzniku trhlin. K porušení dochází v červené oblasti (ohraňovaná žlutou) na obrázku 2.

Jako vstupní polotovary do procesu hydroformování vstupuje předsvářený tvar. Skládá se z ohýbaného plechu do tvaru kvádra a druhého navařeného plechu na čelo kvádra.



Obrázek 2 Řešená oblast

Materiál musí být dobře chemicky odolný z důvodu působení zbytků jídel, čistících prostředků a jiných agresivních složek.

Materiál je zvolen austenitická korozi-vzdorná ocel DIN 1.4301 (se složením dle tabulky 1) od společnosti Alfun a.s.. Výrobce udává velmi dobré vlastnosti pro tvářecí operace viz tabulka 2.

Chemické složení [hm. %]							
C max.	Cr	Ni	Mn max.	Si max.	P max	S max	N max
0,07	17,5-19,5	8,0-10,5	2,0	1,0	0,045	0,015	0,11

Tabulka 1 Chemické složení oceli DIN 1.4301 [4]

Mechanické vlastnosti						
Pevnost	Mez kluzu		Tažnost	svařování*	tažnost u tváření*	korozní odolnost*
Rm [Mpa]	Rp0,1	Rp0,2	A50(min. %)			max. T použití
520-720	230	260	45	3	5	3

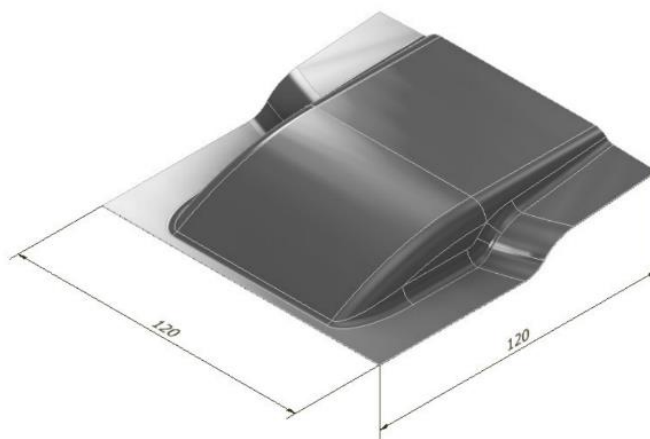
\*

1- Nevyhovující  
2- Dostačující  
3- Dobré  
4- Velmi dobré  
5- Vynikající

*Tabulka 2 Mechanické vlastnosti oceli  
DIN 1.4301 [4]*

V této práci bude rozebírána oblast s největším rizikem pro vznik trhlin. Tato predikce je odvozena z výrobního procesu firmy, kde se tato problematika nacházela. Konkrétně jde o spodní odtokovou část jejíž výřez je na obrázku 3.

V této oblasti je určeno největší riziko vzniku trhliny zjištěné z praxe.



*Obrázek 3 Zkoumaná oblast*

### 1.1 Výrobní možnosti, metody řešení

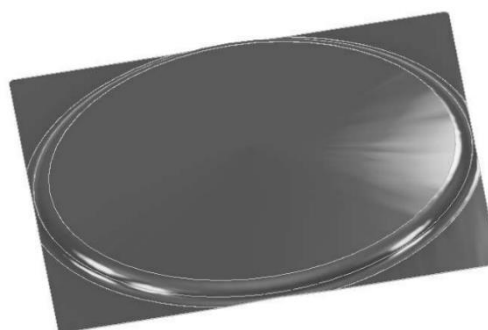
Současný postup výroby je takový, že se do hydroformovacího stroje je vložen polotovár, který je popsán v předchozí sekci. Výsledný produkt se vyznačuje kritickým, v některých případech i vznikem praskliny, v místem vyznačeným ve výsledné simulaci oblasti odtokového kanálku.

Možnosti vyřešení problematiky jsou tři:

- Změna konstrukce
  - Komplettní změna konstrukce kritického místa
  - Zvětšení rádiusu v kritickém oblasti
- Víceoperační tažení

#### Komplettní změna konstrukce

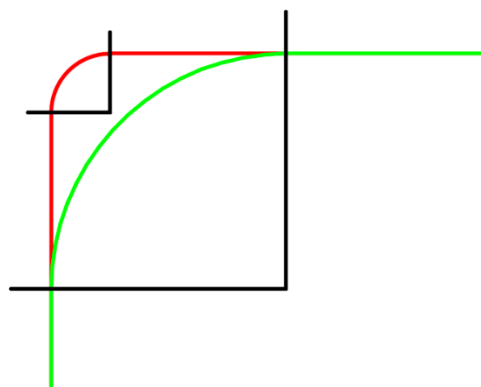
Jedno z možných řešení je komplettní změna konstrukce a změnit nebo odstranit kritickou oblast, pokud je to možné. V tomto případě by to znamenalo změnu nebo případné odstranění odtokového kanálku jako na obrázku 4. Například by se snížila hloubka kanálku, nebo se změnil tvar (například v kolmém řezu je tvarově podobný obdélníku a změním ho na trojúhelníkový tvar).



*Obrázek 4 Odstranění odtokového kanálku*

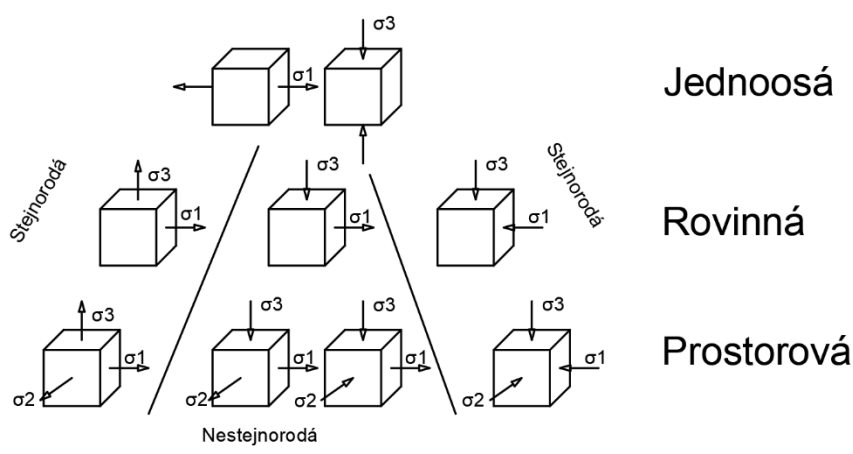
## Zvětšení rádiusu v kritické oblasti

Problematikou prasknutí je dosažení kritické hodnoty napětí v materiálu, než je schopen vydržet, to znamená, že materiál se už nedokáže v daném směru víc roztahovat nebo smršťovat. V plošném namáhání se stane tak, že se materiál do prostoru vtlačí (tlak) nebo se z prostoru roztahuje (tah). Ve zkoumaném případě dochází ke kritickému tahu z důvodu, že navazuje na další části a nemůže se ztenčovat. Zvětšení plochy dochází na úkor ztenčování tloušťky materiálů. Toto napětí se dá snížit tím, že se zmenší plocha v rozích tím, že se zvětší rádius jako na obrázku 5. Červená křivka označuje původní tvar v řezu a zelená křivka ukazuje řez optimalizovanou součástí.



Obrázek 5 Zvětšení rádiusu

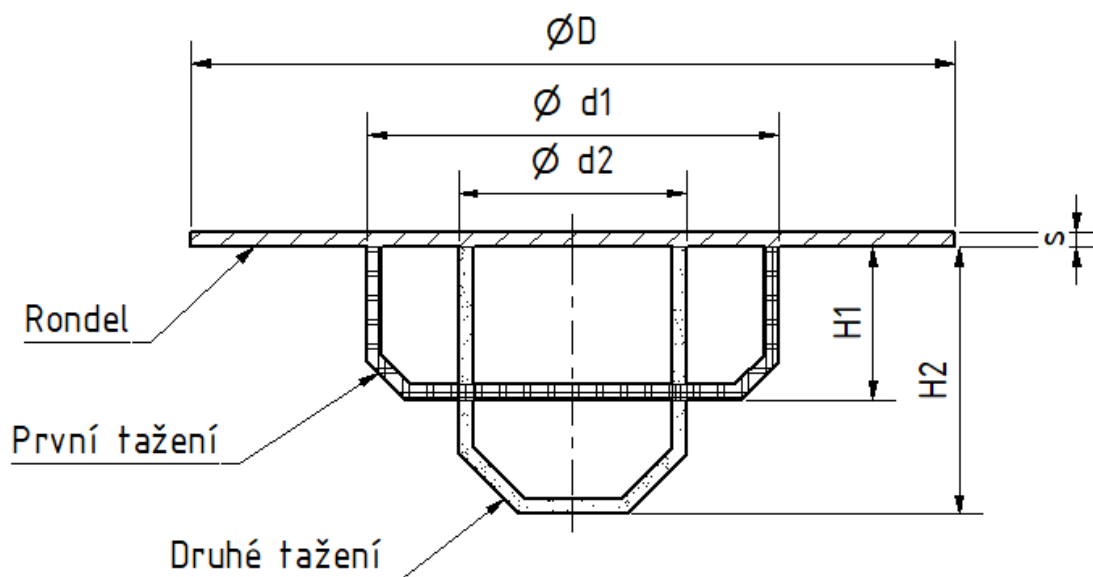
Tenhle typ řešení je nejjednodušší z hlediska úprav. Matrice i výsledný tvar se mění minimálně a v případě úpravy už zavedeného provozu lze do matrice vložit „vycpávku“, která zvětší rádius.



Obrázek 6 Schéma napjatosti

## Víceoperační tažení

Pokud je potřeba vytáhnout výtažek u kterého není možné změnit tvar jako v předchozích dvou případech, tak je možné táhnout výtažek na více operací. Příklad je na obrázku 7 jako víceoperační rotační výtažek. Tento způsob je na výrobu náročný v tom, že při kontinuální výrobě je potřeba stejný počet nástrojů jako počet operací a přibližně po třetí operaci je nutné udělat mezioperační žíhání pro snížení napětí ve výtažku. Velká výhoda je, že se dají vytáhnout velmi hluboké výtažky.



*Obrázek 7 Víceoperační tažení*

Pro funkčnost výrobku je nutné zachovat odtokový kanál, proto nepřipadá v úvahu kompletní změna konstrukce a odstranění odtokového kanálku.

V úvahu připadá řešení zvětšení rádiusu. Toto řešení se v praxi testuje pomocí vycpávek v tažnici, které na výtažku zvětší rádius. Podle tohoto výsledku stačí jen mírně poupravit tažnici.

V této práci bude řešena metoda víceoperačního tažení. Úkolem této práce je vypracovat alternativu při striktním zachování původního tvaru.

## 2 TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ KAPALINOU [5],[6],[7],[8],[9],[17],[18]

Technologie tváření kapalinou je nekonvenční technologie, kdy se na rozdíl od konvenčního pevného tažníku a tažnice, jeden z prvků nástroje nahradí kapalinou. Použití je například u uzavřených profilů nebo u velmi komplikovaných tvarů vyráběných z plechu.

U konvenčních technologií je zapotřebí, aby se tvar tažníku v ose posuvu zužoval nebo zůstal stejný. Tváření kapalinou je výhodné v tom, že nástroj není pevný a může se tvarovat i dle velmi komplikované tažnice. Další výhodou je, že tlak kapaliny je rovnoměrný a působí na plochu v kterémkoliv místě styku s kapalinou.

Typy hydroformování lze rozdělit do dvou kategorií (obrázek 9) hydroformování trubek a hydroformování plechů.

### Hydroformování trubek

Hydroformování trubek lze rozdělit do kategorií podle tlaku kapaliny na nízkotlaké, vícetlaké a vysokotlaké.

### Hydroformování plechů

Hydroformování plechů se dá rozdělit do kategorií podle typu pevného nástroje, kterého plech kopíruje. Dle lisovníku (kapalina nahrazuje tažnici) a dle lisovnice (kapalina nahrazuje tažník).

*Lisovník* – tato kategorie se dá rozdělit do podkategorií hydroformování s membránou a bez ní.

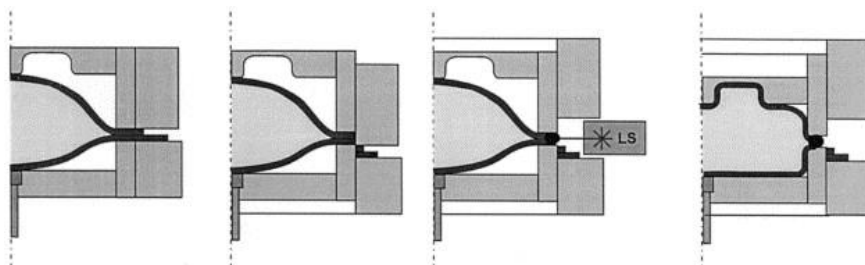
Membrána je pryžová blána, která utěsňuje kapalinu v jedné oblasti čímž snižuje požadavky na těsnost. Výdrž membrány je přibližně 5-10 tisíc tažení.

Tažení bez membrány zvyšuje nároky na řádné utěsnění stroje.

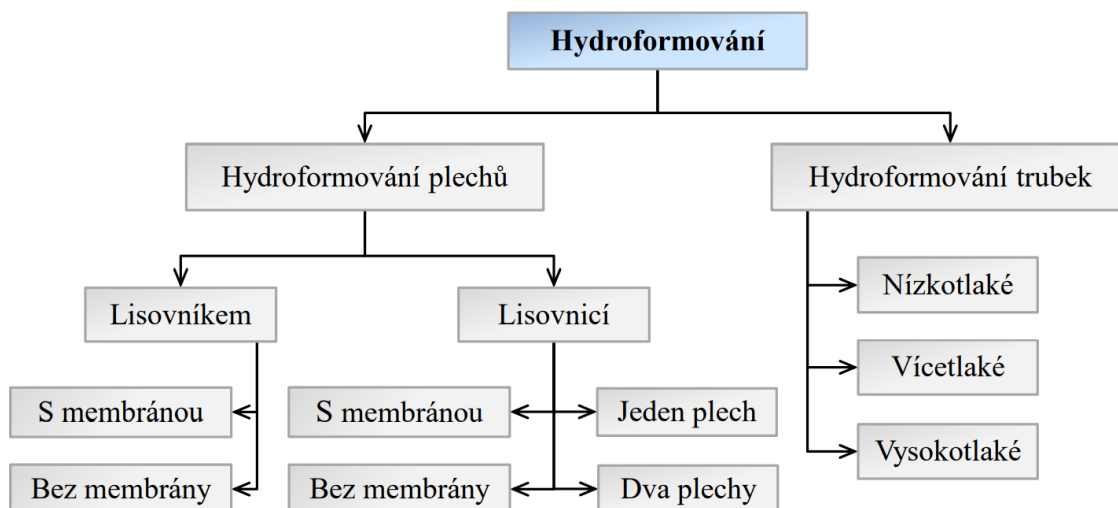
*Lisovnice* – Rozděluje se do dvou podkategorií, a to tažení s membránou a bez ní a formování jednoho nebo dvou plechů záraz.

Tažení s membránou a bez ní je stejné jako u lisovníku.

Kromě hydroformování jednoho plechu jdou formovat i plechy dva. Tento způsob se využívá například u výroby nádrží na palivo. Plechy se na krajích spojí (například svařením) a mezi ně je přes otvor vtlačena kapalina. Tlak kapaliny vytváří mezi plechy prostor. Na podobném principu funguje i hydroformování trubek.



Obrázek 8 Hydroformování dvou plechů [17]



Obrázek 9 Druhy Hydroformování [5]

Metody hydroformování plechů

- Hydroform
- Wheelon
- Flexform
- Hydromechanické tažení
- Tváření uzavřených profilů

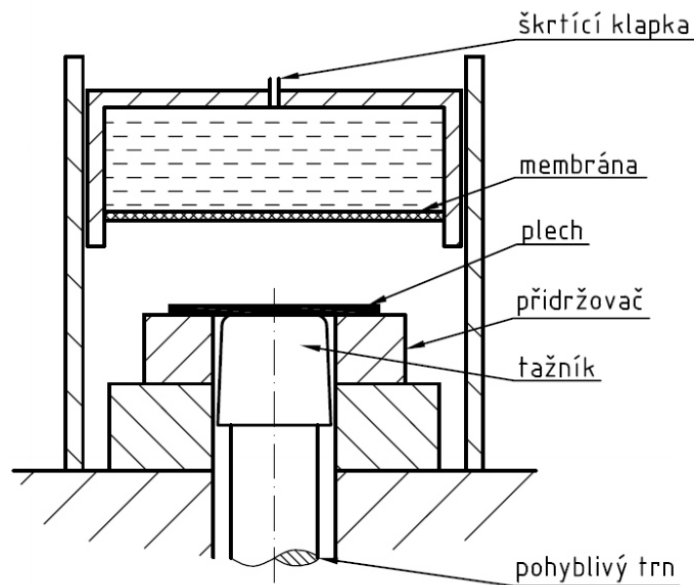
## 2.1 Metoda Hydroform

Jedná se o metodu hydroformování plechů lisovníkem s membránou tudíž kapalina nahrazuje tažnici.

Zařízení se skládá z nádrže, membrány, přidržovače, tažníku a škrťací klapky (obrázek 12). Nádrž s kapalinou je utěsněna pomocí membrány, která přichází do kontaktu s plechem. Do nádrže vstupuje tažník, na kterém se tvaruje plech. Aby se v nádrži udržel konstantní tvářecí tlak kapaliny, tak je na nádrž napojena škrťací klapka, která ho reguluje.

Proces probíhá tak, že jako první sjede nádrž a dojde k uzavření stroje. Následně do nádrže se vsune tažník s plechem a přes škrťací ventil se udržuje konstantní tlak. V posledním kroku dochází k uvolnění přidržovače a výjezdu nádrže, vyhození výtažku a sjezdu tažníku.

Tato metoda je vhodná pro tažení hlubokých výtažků a používá se v automobilovém nebo i leteckém průmyslu. Metoda byla vyvinutá firmou Cincinnati Milling Machine Co. Ohio.



Obrázek 10 Náskres metody Hydroform [8]

Výhody metody jsou:

- Variabilita výroby
- Vhodné pro velké série a hluboké tahy
- Není zapotřebí střídit horní i dolní díl nástroje
- Rovnoměrné rozložení sil
- Nedochází ke zvlnění
- Součinitel tažení je až  $m=0,40$
- Velmi malé odpružení materiálu
- Průměrné ztenčení je okolo 10%

Nevýhody metody jsou:

- Vysoké požadavky na těsnost
- Vysoká pořizovací cena
- Delší výrobní časy z prodlevy při zvyšování tlaku
- Zapotřebí vyšší tažné síly než u konvenčních technologií

## 2.2 Metoda Wheelon

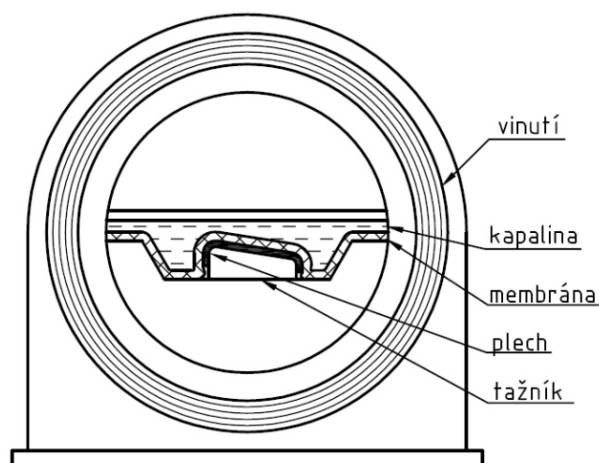
Jedná se o hydroformování lisovnicí jednoho plechu s membránou tudíž kapalina nahrazuje tažník.

Zařízení se skládá z membrány, matrice (označené na obrázku 11 jako tažník), válce obtaženého vinutím a samotné kapaliny. Kapalina je uzavřena membránou, která je v kontaktu s plechem na matrici. Celá soustava je vložena do válce, který je zpevněn vinutím, kvůli vysokým přetvárným tlakům.

Činnost probíhá tak, že ze stroje vyjede platforma, na kterou se dá matrice a na ní plech. Následně platforma zajede do stroje a uzavře se. Pak dojde k natlakování kapaliny a tváření plechu samotného. Na závěr dojde k upuštění tlaku, otevření a vyndání výtažku. Tato metoda je vhodná pro nízké výtažky ve velké sérii. Dají se zpracovávat i pevné materiály jako například titan, korozivzdorné oceli nebo i měkké například hliník. Dokončovací operace nejsou většinou zapotřebí díky vysoké kvalitě výtažků.

Metoda Wheelon nebo i Verson-byla vynalezena Orvillem Albertem Wheelonem (12.6.1906–9.1.1966). Wheelon byl letecký inženýr, který tento proces vynalezl a jako jeden z prvních užil titanu v moderním leteckém průmyslu.





Obrázek 11 Náskres metody Wheelon [8]

- Výhody metody jsou:
- Může se táhnout více různých dílů najednou
  - S gumovou překážkou lze vyrábět různé dezénované povrchy dílců
  - Pro velké série a prototypy
  - Energetická nenáročnost
  - Tichý chod
- Nevýhody metody jsou:
- Vysoká cena
  - Velké rozměry
  - Důkladnější utěsnění
  - Vysoký tvářecí tlak

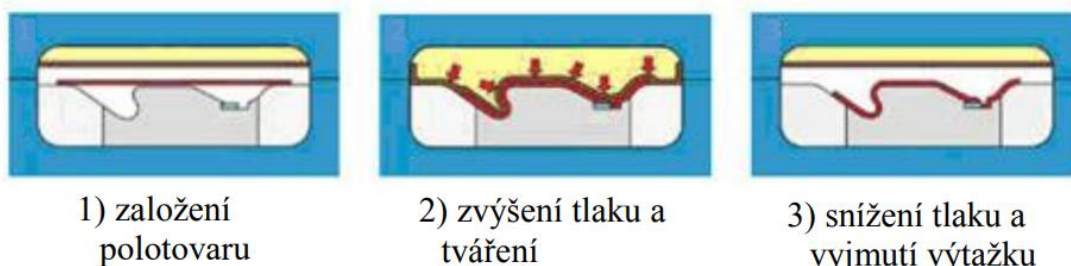
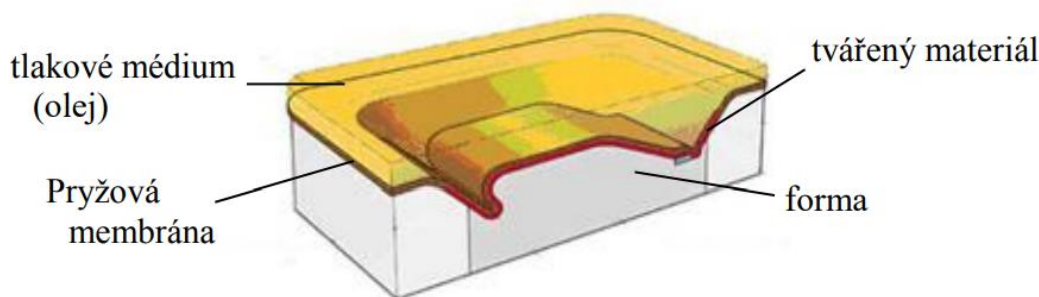
## 2.3 Metoda Flexform

Princip metody Flexform je kombinace předchozích metod. Jedná se o hydroformování lisovnicí plechu s membránou. Plech kopíruje tvar tažnice a může tvořit i negativní geometrii tak jak je vyobrazeno na obrázku 12.

Součástí stroje je vrchní nádrž ze strany kontaktu s plechem uzavřená membránou a matrice. Jako tvářecí médium se používá nejčastěji olej a dosažený tlak dosahuje až 140 MPa. Tvářecí síla je až 150 000 tun na plochu (dle velikosti tvářené plochy).

Funkce probíhá tak že dojde k uzavření stroje, následně natlakování a tvarování plechu a na závěr snížení tlaku, otevření stroje a vyjmutí plechu. Celá operace je vyobrazena na obrázku 12.

Tato technologie se využívá při tváření dílů motorů v leteckém průmyslu a při výrobě prototypů v automobilovém průmyslu.



Obrázek 12 Metoda Flexform s kroky [9]

Výhody metody jsou:

- Levnější výroba součástí
- Vysoká kvalita výtažků
- Nízké náklady na nástroje
- Lze tvářet tvarově složité výtažky
- Vhodná technologie i pro tváření špatně tvářitelných materiálů

Nevýhody metody jsou:

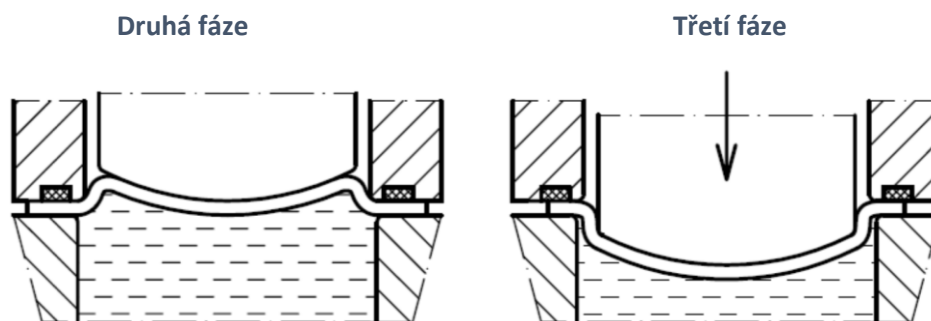
- nutnost vysokotlakých pump

## 2.4 Metoda Hydromechanického tažení

Metoda hydromechanického tažení (dále jen HMT) je metoda hydroformování plechů lisovníkem bez membrány. Je to metoda podobná Hydroformu s několika zásadními rozdíly. Například není zde membrána a na začátku se zvýší tlak kapaliny v nádobě čímž dojde k vyboulení plechu opačným směrem, než probíhá tváření. Dojde ke styku plechu a tažníku. V následujícím kroku probíhá samotné tažení, tak jak je vyobrazeno na obrázku 13.

Zařízení se skládá z přidržovače, nádrže kapaliny, těsnění a tažníku. Těsnění je na kraji nádrže a dotýká se plechu. V prvním kroku sjede přidržovač na plech, který tlačí na těsnění a dochází k uzavření kapaliny. Následně dojde ke zvýšení tlaku a vyboulení plechu směrem k tažníku. A ve třetí fázi probíhá samostatné tváření sjezdem tažníku na plech a protlačení do nádrže. Tvářecí tlak se reguluje přepouštěcími ventily, k udržení konstantního tvářecího tlaku.

Z produkce HMT směřuje asi 85 % do automobilového průmyslu, 10 % do techniky pro domácnost a gastronomii a 5 % do elektrotechniky včetně lékařské techniky. Typickými výrobky pro automobilový průmysl jsou části katalyzátoru, nádoby, vany, díly tlakové nádoby hasicího přístroje (Smart), olejové filtry, přechody a koncovky výfukového potrubí (Porsche, VW, BMW), reflektory světlometů a výfuková potrubí s koncovkami pro motocykly (KTM, BMW). Z techniky pro domácnost jsou to nádoby fritéz, kávových automatů, odšťavňovačů a mixerů, nádobí, umyvadla, dřezy aj., převážně vyráběné z nerezavějící oceli. Technologie HMT je vhodná i pro realizaci designérských prací.



*Obrázek 13 Druhá a třetí fáze HMT [8]*

- |                       |  |
|-----------------------|--|
| Výhody metody jsou:   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Složitý tvar zvládne i na 1 tažení</li> <li>- Velká geometrická přesnost</li> <li>- Vysoká jakost povrchu</li> </ul>                  |
| Nevýhody metody jsou: | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Výtažek jen s přírubou</li> <li>- Vysoký tlak přidržovače</li> <li>- Nižší produktivita</li> <li>- Zapotřebí výkonné pumpy</li> </ul> |

### 3 TVAŘITELNOST MATERIÁLU PŘI PLOŠNÉM TVÁŘENÍ [11], [12], [13], [14], [15], [21], [22]

**Tvařitelnost materiálů** je schopnost trvale měnit tvar bez porušení tvářeného tělesa v konkrétních technologických podmínkách. Tvařitelnost tedy představuje souhrn vlastností materiálu, nástroje a prostředí, které za daných termomechanických podmínek určují schopnost trvalé změny tvaru tělesa bez porušení a umožňují tak vyrobit součást s požadovanými rozměry a vlastnostmi.

#### Faktory tvařitelnosti v plošném tváření

Specifika pro posuzování tvařitelnosti v oboru tváření plechů, tenkostěnných trubek, a profilů vyplívá z:

- Vnější význam geometrického faktoru (tloušťka plechu, šířka vzorku, ...)
- Většího vlivu kvality povrchu
- Vlivu anizotropie
- Předpoklad biaxiálního stavu napjatosti

Proto se používají i další ukazatele plastičnosti. (Kromě známých  $A$ ,  $Z$ ,  $R_{p0.2}/R_m$ .)

- $r$  ... součinitel plastické anizotropie
- $\sigma_2/\sigma_1 = \alpha$  ... ukazatel stavu napjatosti
- $n$  ... exponent deformačního zpevnění

#### 3.1 Anizotropie

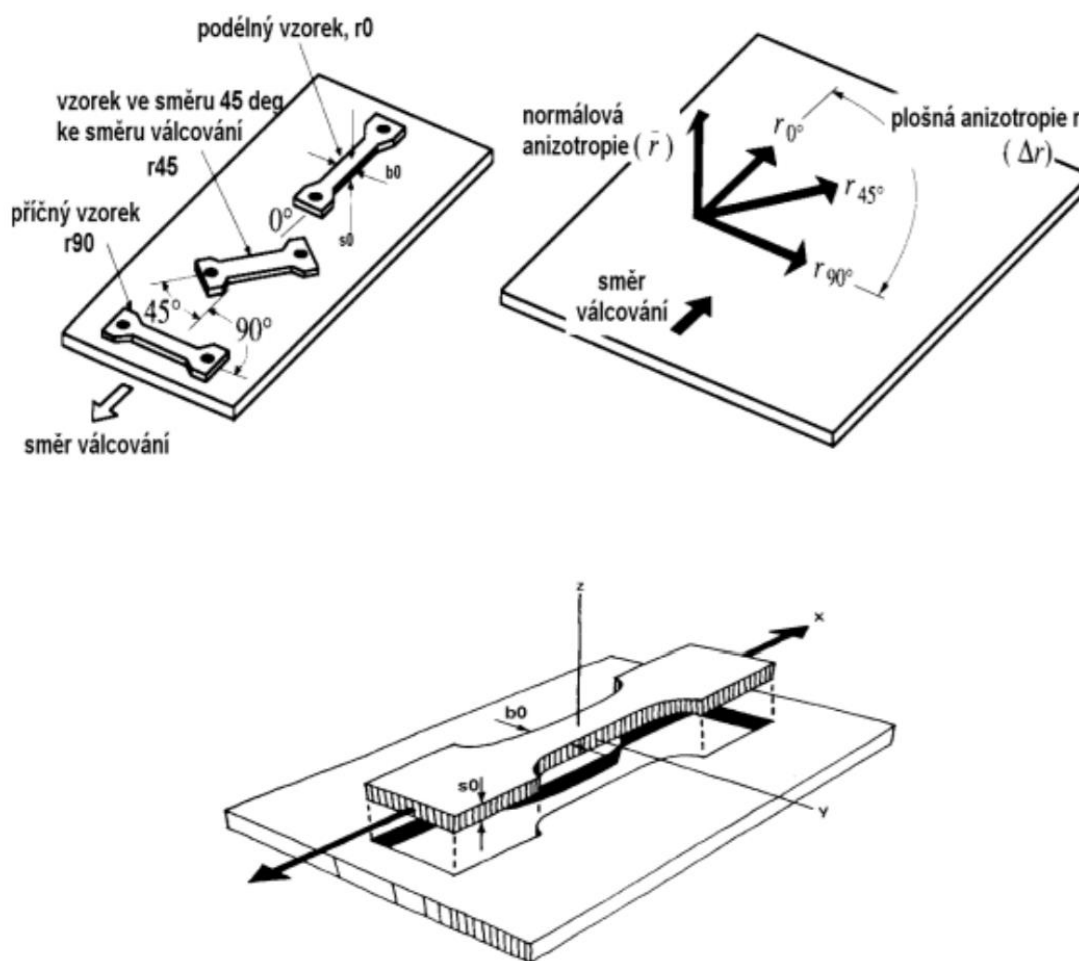
V důsledku technologie výroby polotovaru plechu vzniká v obecném pojetí struktura, která ovlivňuje vlastnosti. Jde o:

- **Strukturální anizotropie.** Je dána ve směru válcování plechu pomocí protažením, redistribucí a orientací vměstků. Nelze ji odstranit tepelným zpracováním.
- **Krystalografická anizotropie.** Je daná prodloužením a usměrněním zrn ve směru válcování. Lze ji ovlivnit technologickým postupem (válcováním za tepla a za studena) a tepelným zpracováním.

**Strukturální anizotropie** má hlavní efekt v rozsahu deformací blízkých k poruše materiálu.

**Krystalografická anizotropie** ovlivňuje hlavně hodnoty  $r$ ,  $R_{p0.2}$  a  $R_m$ .

## Součinitel plastické anizotropie $r$



Obrázek 14 Vzorky k určení plošné anizotropie [21]

Vzorky pro plošnou anizotropii se vyřezávají z plechu podobně jakou u zkoušky tahem (zkouška tahem je v kapitole 3.3 níže) jedná se o odebrání vzorku pod různými úhly dle směru válcování. Při výrobě válcováním se postupně tvářením materiálu vytváří na hranicích zrn takzvaná vlákna. Vlákna ovlivňují mechanické vlastnosti, proto se vzorky odebírají minimálně aspoň ze 3 různých úhlů jako je vyobrazeno na obrázku 14 vlevo nahoře.

$$\varphi_b = \ln \left( \frac{b_0}{b} \right) \quad (3.1)$$

$\varphi_b$  – Logaritmické přetvoření šířky vzorku

$b_0$  – Původní šířka vzorku

$b$  – Šířka vzorku po přetvoření

$$\varphi_h = \ln \left( \frac{s_0}{s} \right) \quad (3.2)$$

$\varphi_h$  – Logaritmické přetvoření šířky vzorku

$s_0$  – Původní průřez vzorku

$s$  – Průřez vzorku po přetvoření

$$r_\alpha = \frac{\varphi_b}{\varphi_h} \quad (3.3)$$

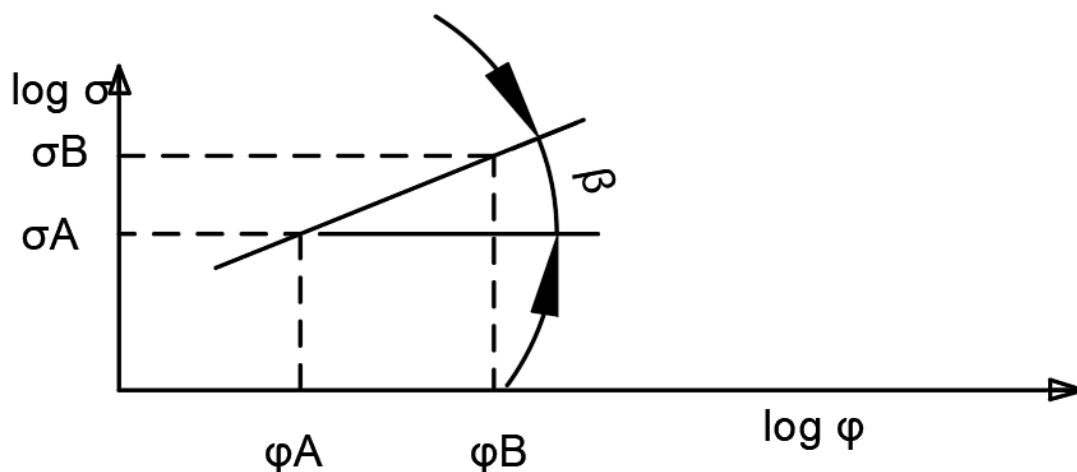
$r_\alpha$  – koeficient plastické anizotropie vzorku vyřezaným pod úhlem  $\alpha$  dle směru válcování

$$r_{stř} = \frac{r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}}{4} \quad (3.4)$$

$r_{stř}$  – je střední hodnota koeficientu plastické anizotropie

### 3.2 Exponent deformačního zpevnění $n$

Exponent deformačního zpevnění udává schopnost materiálu se zpevňovat při deformaci. Hodnota se může získat pomocí úhlu svírající křivka s osou  $\log \varphi$  (na obrázku 15 je vyobrazen jako úhel  $\beta$ ) dle vzorce 3.5 nebo přes dvoubodovou metodu zobrazenou na obrázku 15 a zapsanou vzorcem 3.6.



Obrázek 15 Princip dvoubodové metody určení exponentu  $n$

$$n = \tan \beta \quad (3.5)$$

$$n = \frac{\log \sigma_B - \log \sigma_A}{\log \varphi_B - \log \varphi_A} \quad (3.6)$$

$n$  – exponent deformačního zpevnění

$\beta$  – úhel svírající křivka s osou  $\log \varphi$

$\sigma_{A,B}$  – napětí v materiálu v bodech A a B

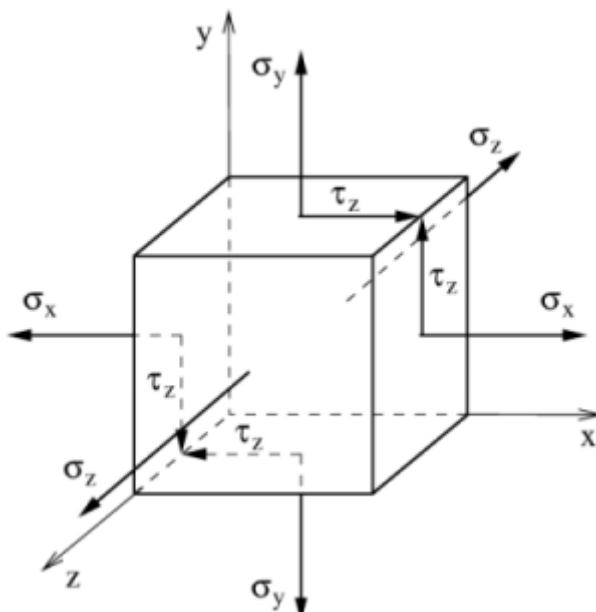
$\varphi_{A,B}$  – Přetvoření materiálu v bodech A a B

### 3.3 Rozbor stavu napjatosti

V tělese zatíženém vnějšími silami vzniká napjatost. Ve zvoleném místě zatíženého tělesa lze napjatost vyjádřit třemi normálovými složkami  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  a šesti smykovými složkami napětí  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{xz}$  a  $\tau_{zx}$  orientace je zobrazena na obrázku 16.

Ze zákona o sdružených smykových napětí plyne že:  $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ;  $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ ;  $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ . K obecnému stavu napjatosti stačí pouze tři normálové a tři sdružené smykové složky napětí.

Stav napjatosti vznikající při tváření lze rozdělit do tří kategorií jednoosé, dvouosé a tříosé.



Obrázek 16 Složky napětí [14]

#### Jednoosá napjatost (Přímková)

Jedná se o prostý tah a tlak, tyto složky působí pouze v jednom směru.

V tomto případě se musí dvě normálové složky rovnat 0 a jedna naopak musí být nenulová. Jak je označeno na obrázku 17.

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_3 \neq 0; \sigma_2 = \sigma_1 = 0$$

#### Dvouosá napjatost (Rovinná)

U dvouosého napětí jsou dvě složky nenulové a jedna nulová.

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 \neq 0; \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_1 \neq 0; \sigma_2 = 0; \sigma_3 \neq 0$$

$$\sigma_1 = 0; \sigma_2 \neq 0; \sigma_3 \neq 0$$

#### Tříosá napjatost (Prostorová)

U Tříosého napětí jsou všechny složky normálového napětí nenulové.

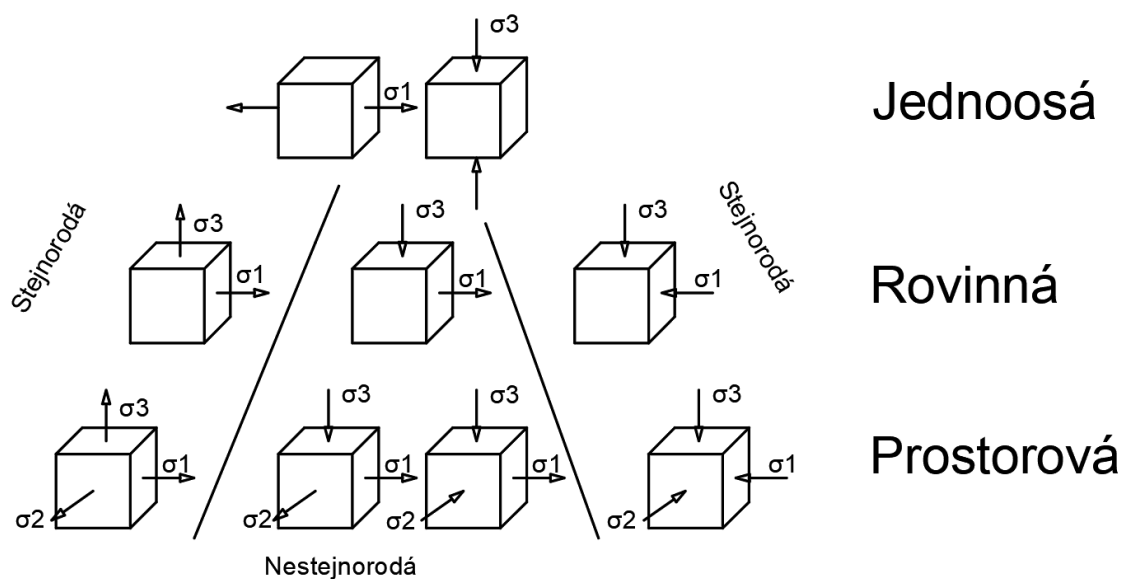
$$\sigma_x \neq 0; \sigma_y \neq 0; \sigma_z \neq 0$$

#### Stejnorodá napjatost

Stejnorodá napětí směřují všechny do stejného místa nebo všechny směřují od místa působení. Příkladem tak vzniklé deformace je tah nebo tlak. V praxi u tváření se projeví například zvlněním (tlakové napětí) plechu nebo ztenčením stěny, které může vést ke vzniku trhliny. V obrázku 17 jsou zobrazeny vždy jako první a poslední zobrazená napjatost.

## Nestejnorodá napjatost

Napjatosti působí nezávisle na ostatních napjatostech směřujících do bodu a je pouze u rovinné a prostorové napjatosti. V praxi se může projevit deformací jako smykem nebo krutem



Obrázek 17 Schéma napjatosti

## Ukazatel stavu napjatosti

Ze směrů napětí je odvozen ukazatel stavu napjatosti  $\alpha$

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (3.1)$$

Kde:  $\alpha$  – ukazatel stavu napjatosti

$\sigma_{1,2}$  – Rovinná napětí, které jsou na sebe navzájem kolmá

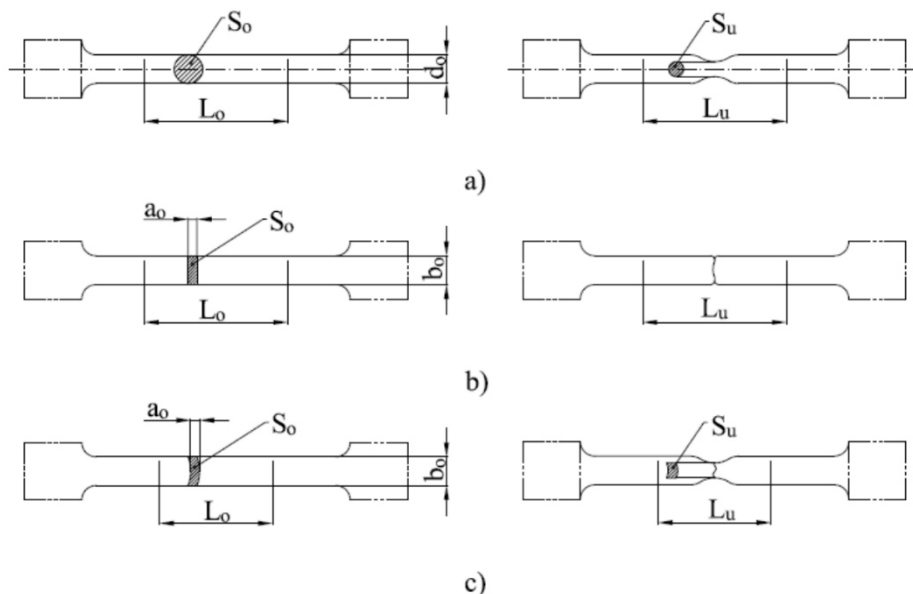
Záporná hodnota se vyskytuje u nestejnorodého rovinné napjatosti například v přírubě. Kladná hodnota se vyskytuje u stejnorodé osově napjatosti, jedná se o oblasti, kde se materiál v obou osách roztahuje nebo stahuje, příklad tohoto stavu napjatosti je například na vrcholu tvaru bubliny.

## 3.4 Zkouška tahem

Zkouška tahem je zkouška statická, to znamená že celková rychlost testu vzorku je pomalá. Zkouška se využívá pro zjištění tahových a plastických hodnot zkoumaného materiálu jako například  $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A$ , atd.

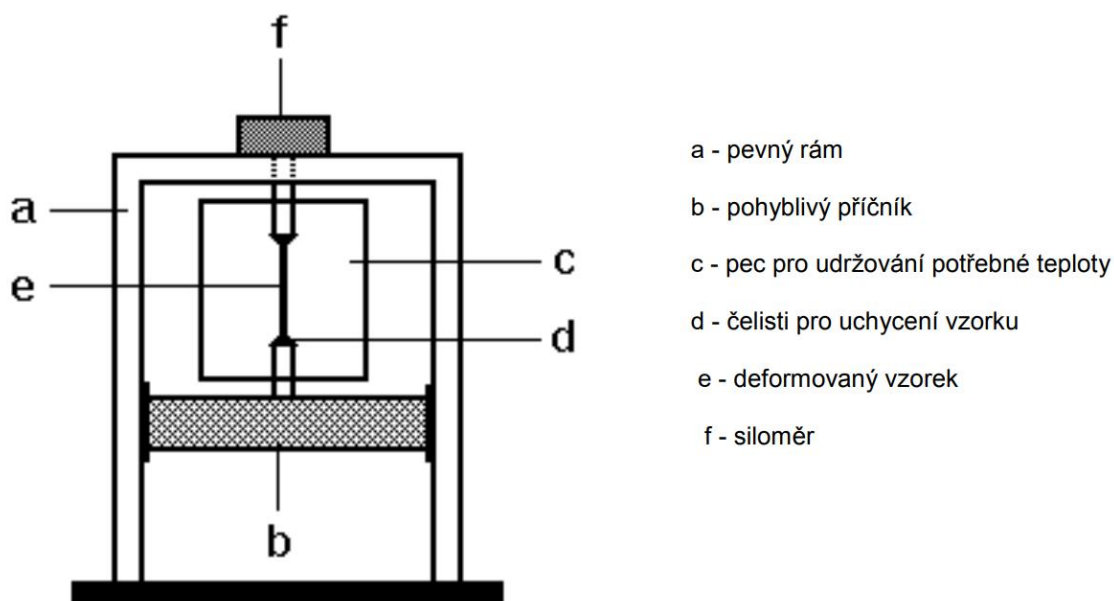


Zkouška tahem se provádí na normovaném vzorku, který je uložen do zkušebního stroje, který namáhá zkušební vzorek tahovým napětím. Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 10 002-1. Jako zkušební vzorek se používá kruhový plný vzorek, vzorek z plechu, vzorek z kruhové tyče. Typy vzorků jsou vyobrazeny na obrázku 18 níže.



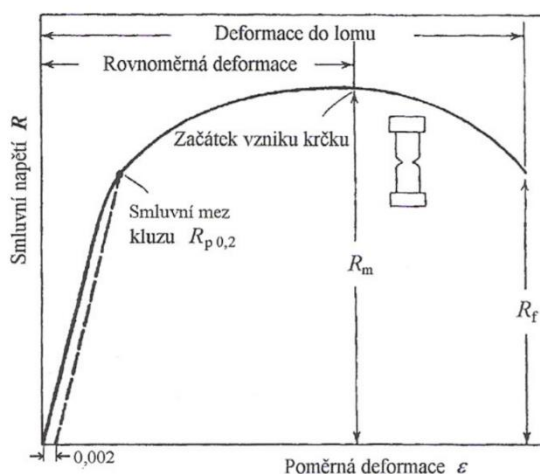
Obrázek 18 Zkušební vzorky a) kruhový vzorek; b) obdélníkový vzorek; c) vzorek vyřezávaný z trubky [13]

Zkouška tahem se provádí v laboratorních podmínkách na speciálních strojích. Vzorek se většinou upevňuje pomocí závitu do čelistí. Zkušební stroj se skládá ze základního rámu. Na rámu je upevněná pohyblivá základní deska (pohyblivý příčník). Za ten a za vrchní část jsou připevněny čelisti. Za vrchní upínací část je upevněn i siloměr. Ke stroji lze přidat i další zařízení jako třeba pec pro udržení konstantní teploty vzorku nebo chlazení k odebrání teploty způsobené přetvořením tělesa nebo třeba i termokameru atd. Náčrtek je na obrázku 19 níže.

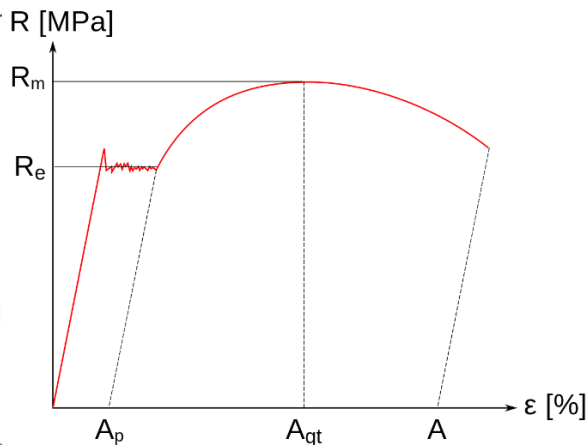


Obrázek 19 Schéma zkušebního stroje [13]

Zkouška probíhá tak, že po upevnění zkušební vzorku začne sjíždět spodní základna čímž se začne vytvářet tahové napětí ve vzorku. Napětí se zvyšuje, dokud nedojde k prasknutí vzorku a tím ztracením odporu k postupnému posunutí spodní základny. Ze zkoušky dostaneme hodnoty, které jsou vyneseny v grafu na obrázcích 20 a 21.



Obrázek 20 Graf s nevýraznou mezí kluzu [19]



Obrázek 21 Graf s výraznou mezí kluzu [11]

**Re** – je pevnost na mezi kluzu. Do této hodnoty je deformace elastická a projeví se v grafu konstantním stoupáním do hodnoty meze kluzu.

**Rp0,2** – je mez pružnosti u materiálů s nevýraznou mezí kluzu

**Rm** – Mez pevnosti v tahu je hraniční hodnota napětí  $\sigma_n$ , při které ještě není porušena celistvost materiálu.

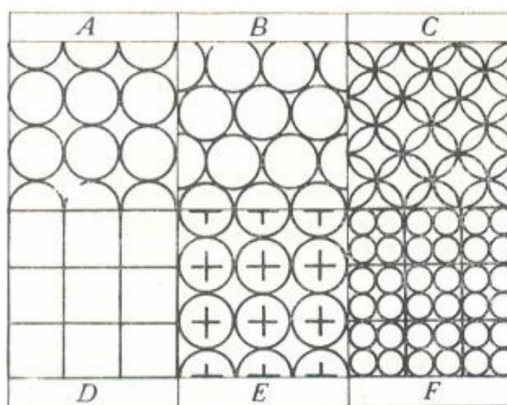
**A** – Tažnost materiálů. Tažnost je trvalé poměrné prodloužení po přetržení. Je to poměr výsledné délky/ původní délky a hodnota je uváděná v procentech.

### 3.5 Diagram mezní tvařitelnosti

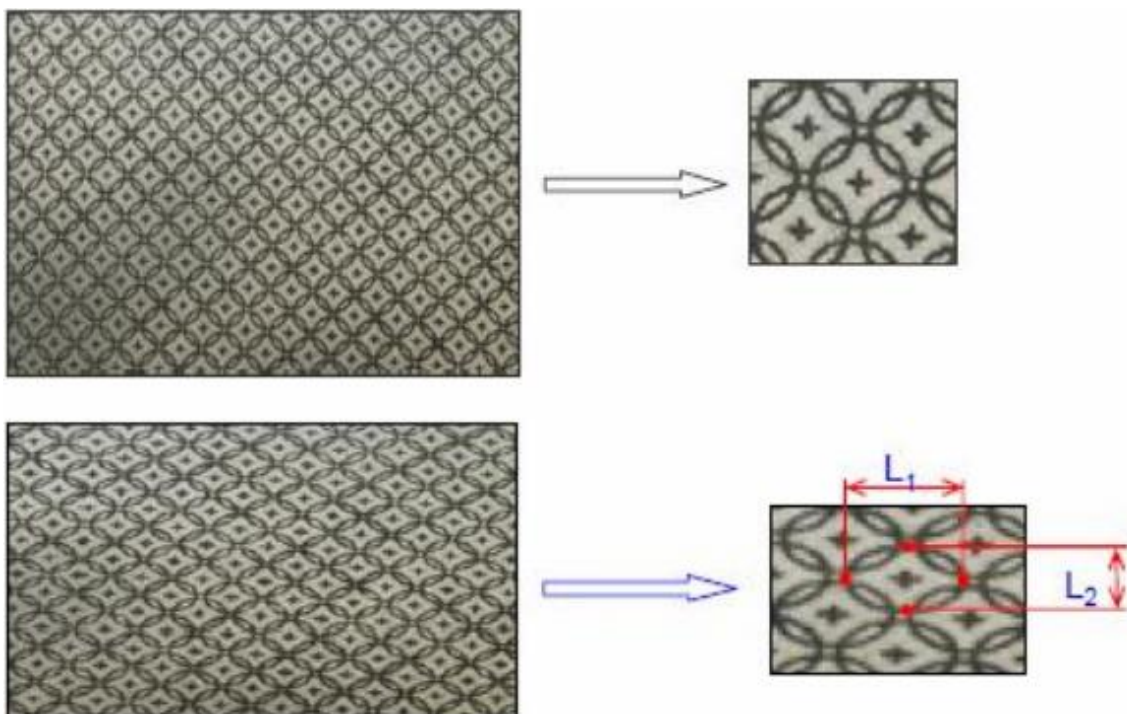
K zjištění toku materiálu v plošném tváření se používá metoda sítí Z pohledu limitního stavu se vychází z předpokladu, že problém nastane v místě největšího ztenčení plechu. Zjištění toku materiálu jde teoreticky pomocí simulačního programu nebo experimentálně.

## Experimentální metoda

Tato metoda spočívá v nanesení vhodné sítě na plech a určení velikosti přetvoření. Příklady sítí, které lze nanášet na je na obrázku 22. Metoda spočívá v tom, že před deformací se nanese síť prvků o jasných rozměrech (velmi vhodné jsou kružnice) a po deformaci se změří změna délek v prvku. Jako příklad se použijí například kružnice o průměru  $D$ . Po tváření se kružnice zvětší, zmenší nebo nejpravděpodobněji změní na elipsu a z té se změří hlavní poloosa a vedlejší poloosa a přes tyto hodnoty se zjistí přetvoření dle vzorce 3.7 a 3.8, které jsou níže.



Obrázek 22 Přehled nejpoužívanějších vzorů [15]



Obrázek 23 Ukázka deformace sítě [15]

Z textury lze odečíst hodnotu  $L_1$  pro tah a  $L_2$  pro tlak.

Odečtení hodnot je vyobrazeno na obrázku 24.

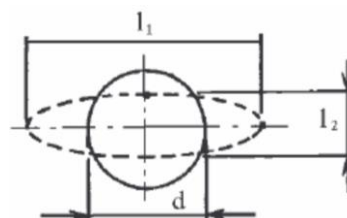
$$\varepsilon_{tah} = \frac{L_1 - d}{d} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{tlak} = \frac{d - L_2}{d} \quad (3.8)$$

$\varepsilon_{tah}$  – Poměrné přetvoření pro tah

$\varepsilon_{tlak}$  – Poměrné přetvoření pro tlak

$d$  – původní průměr kružnice před přetvořením



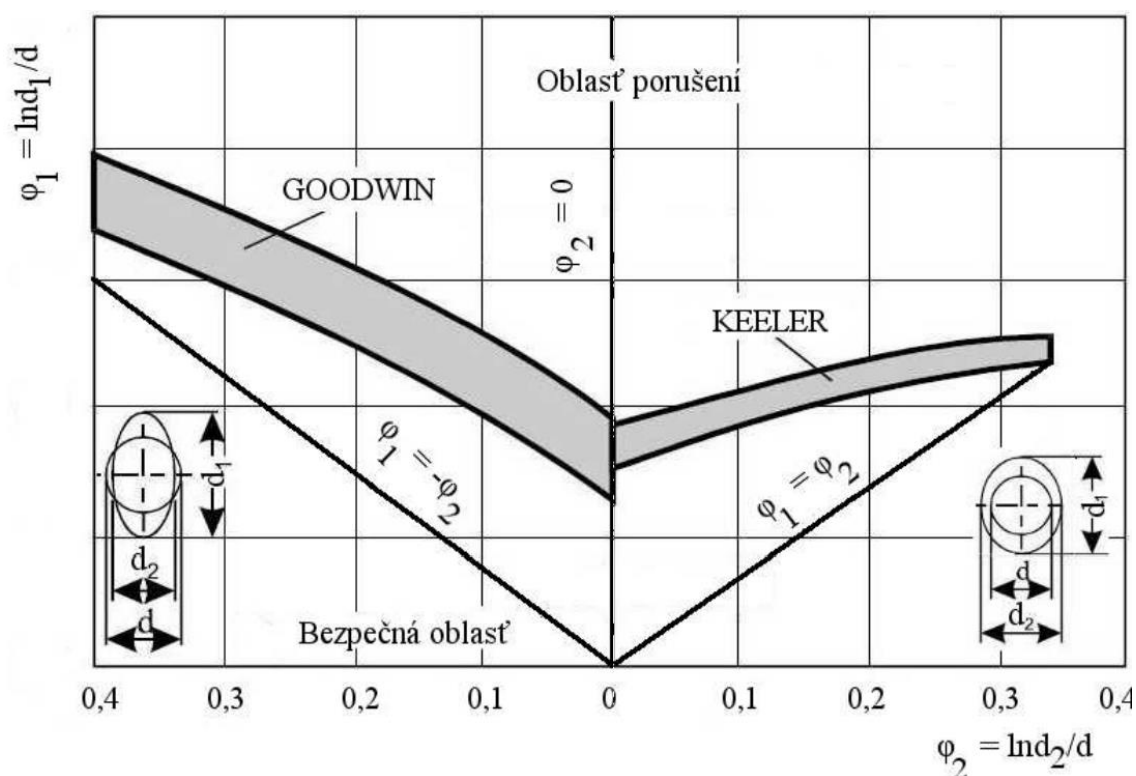
Obrázek 24 Odečtení hodnot z kružnice [15]

$L_{1,2}$  – délka hlavní a vedlejší poloosy elipsy po přetvoření

$$\pm \varphi_{tah, tlak} = \ln(1 \pm \varepsilon_{tah, tlak}) \quad (3.9)$$

## FLD diagram

Z předchozího odstavce jsme zjistili spoustu hodnot, které nám ale neříkají, jestli je hodnota pro dané přetvoření vhodná, hraniční nebo kritická. Proto se hodnoty vynesou do FLD diagramu. Na obrázku 25 je příklad Keller-Goodwinova diagramu. Lze zde rozeznat bezpečnou oblast, oblast hraniční (na obrázku vyznačená šedou zónou) dle Kellera a Goodwina a oblast porušení. Všeobecně platí pravidlo, že je vhodné mít body jen v bezpečné oblasti.



Obrázek 25 Diagram Keller-Goodwin [20]

## 3.6 Povrchové vady

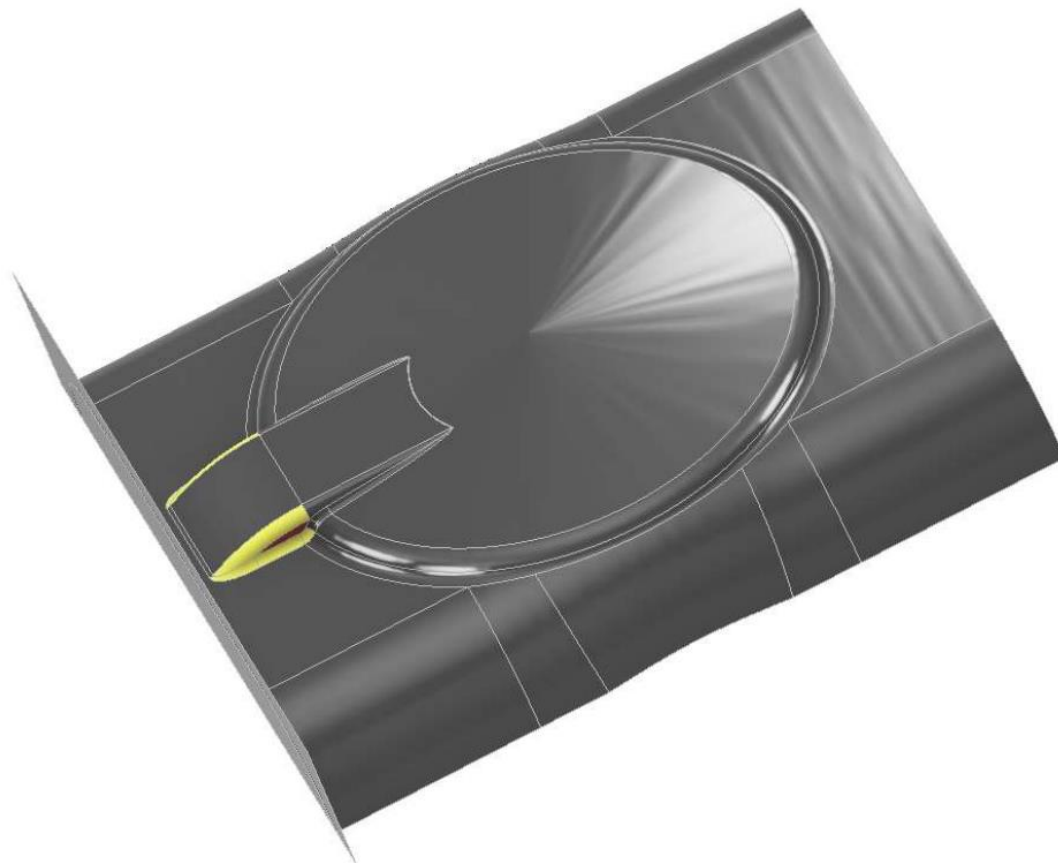
Technologie hydroformování je z hlediska eliminace poškození povrchu velice vhodná, jelikož samotné působení kapalinou nemůže povrch poškodit, ale i tak může vzniknout povrchová vada díky samotnému tváření kovu.

**Luedersovy čáry** představují ztrátu stability na mikroúrovni, a to při deformacích na mezi kluzu. Toto se vyskytuje například u neuklidněných ocelí, ocelí po deformačním stárnutí nebo u některých Al-Mg slitin. U tahové zkoušky na mezi kluzu vzniká prodloužení bez vzrůstu napětí (tzn Luedersova deformace). Předejít této deformaci se dá zařazením hladícího válcování po žitání.

**Pomerančová textura** se často objevuje na povrchu výlisků a vyskytuje se u materiálů s hrubým zrnem.

## 4 ANALÝZA PROBLÉMU

V praxi dochází ke kritickému zúžení stěny ve vyznačené oblasti na obrázku 26. O žluté oblasti se dá z praxe říct, že se nachází v bezpečné oblasti dle FLD diagramu. Zde dochází k výraznému nekritickému zúžení stěny. Červená oblast je v kritické oblasti. Dochází k porušení celku u asi 5-10 % případů.

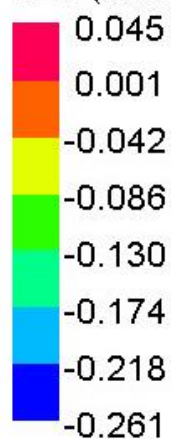


*Obrázek 26 Oblast z praxe*

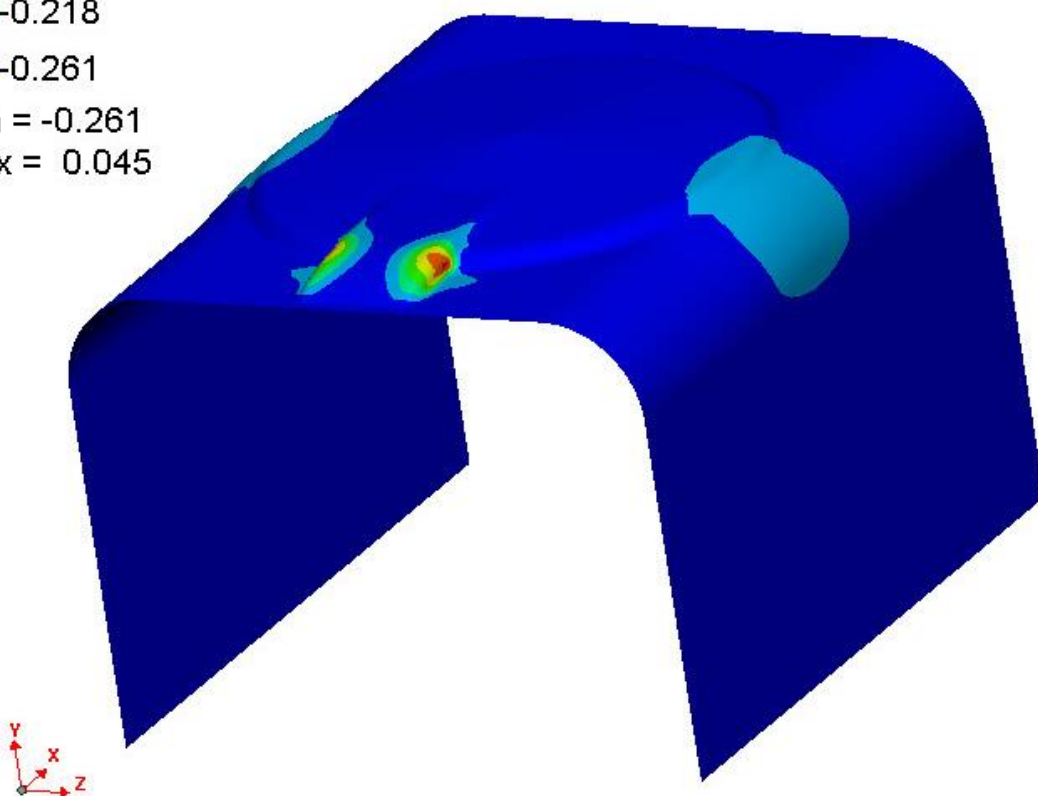
Pro ověření této teze je provedena simulace v programu PAM-STAMP. Výsledek simulace je na obrázcích 27 a 28. Na obrázku 27 je vyobrazena simulace současného stavu a na obrázku 28 je FLD diagram. Červená oblast na obrázku 27 je místo kritického ztenčení a s vysokou pravděpodobností vzniku trhliny.

Oranžová oblast je v FLD diagramu hraniční. Ostatní barvy jsou v bezpečné oblasti

Project '01'  
Module 'State 9 : Time = 24.000015'  
FLD (strain) - Rupture risk - Membrane - FLC Blank (absolute)



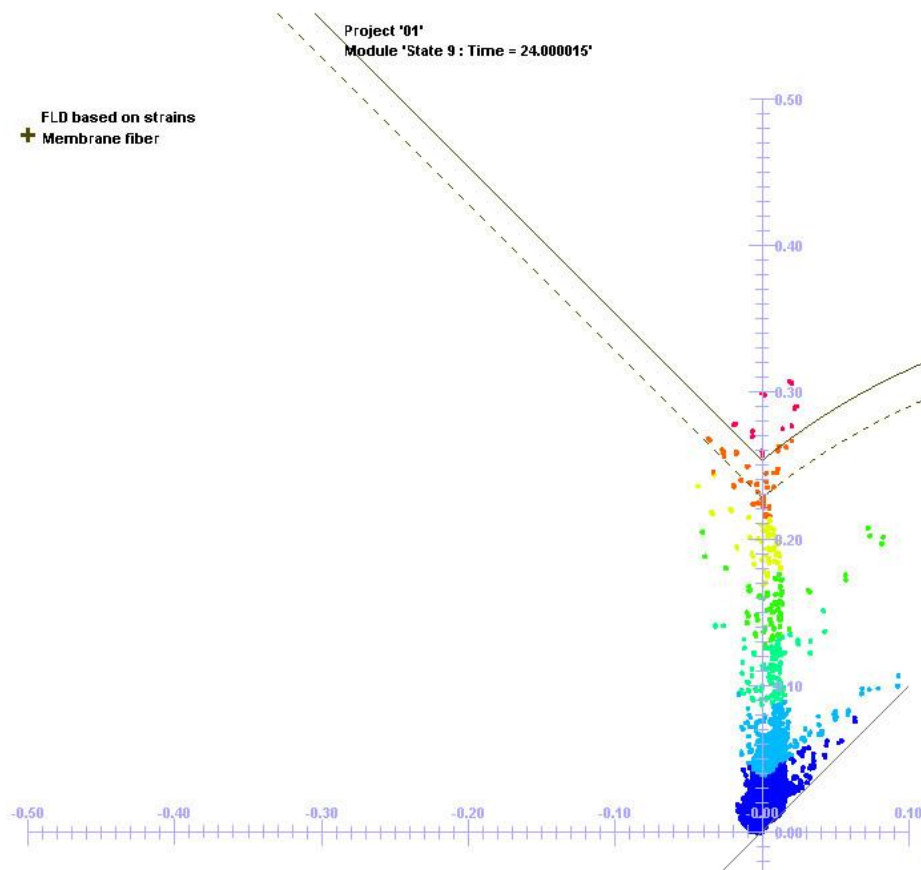
Min = -0.261  
Max = 0.045



*Obrázek 27 Simulace výchozího stavu*

Ze simulace vyplývá, že materiál se roztahuje hlavně v oblasti tváření odtokového kanálku a „neubírá“ materiál ze vzdálenějších oblastí do oblasti tváření.





Obrázek 28 FLD diagram simulace současného stavu

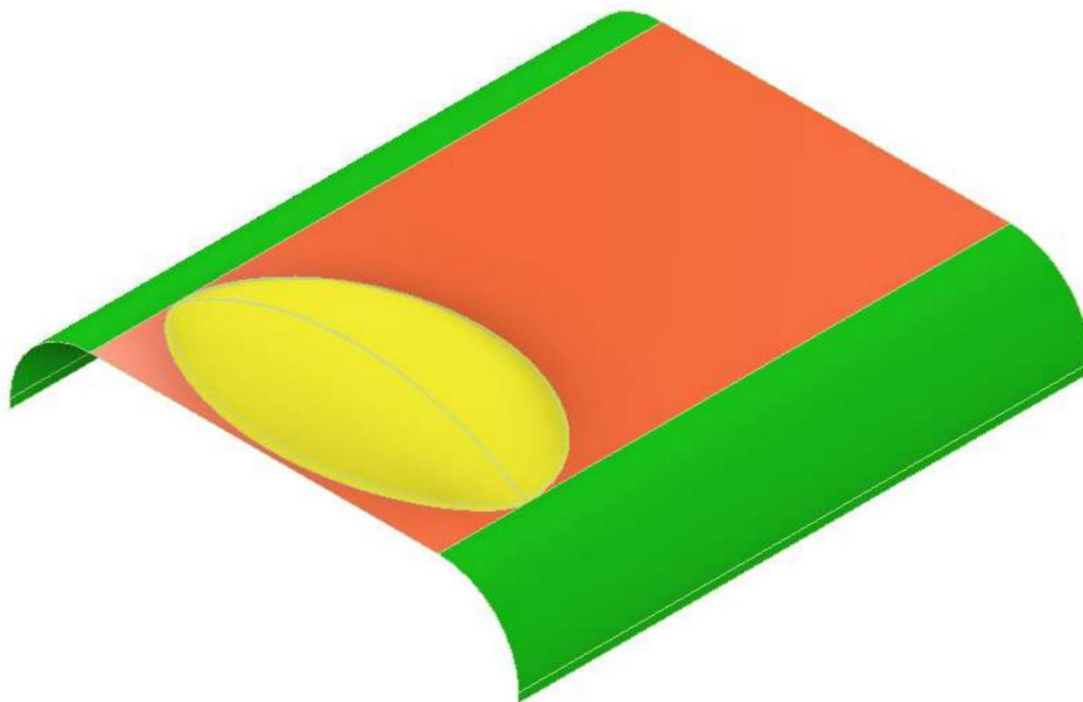
## Návrh řešení problému

Z hlediska zvoleného řešení víceoperačního tažení máme možnost předpřipravit tvar, který se v závěrečné operaci jen minimálně dotvaruje do požadovaného tvaru. Díky informace ze simulovaného modelu na obrázku 27. Jako ideální tvar pro tváření pomocí hydroformingu je podobný jako bublina a podle informace ze simulace se bude materiál stahovat z blízké oblasti okolo odtokového kanálku. Materiál v bublině se bude roztahovat rovnoměrně. Bude získáno protažení materiálu po celé délce plochy, a to nejen v malé oblasti okolo výsledného tvaru odtokového kanálku.

Další možností je už specifický tvar, tam hrozí nerovnoměrné roztažení materiálu, proto je zvolen tvar bubliny.

Z analýzy vyplývá, že oblast vzniku trhliny je minimální. V praxi vzniká trhlina u 5-10 % výtažků. Z toho lze udělat závěr, že je zapotřebí jen jedné mezioperace a závěrečné operace.

V mezioperaci bude hydroformován již zmíněný tvar „bublina“ vyobrazený na obrázku 29. Jedná se o tvar nepravidelné kupole vyobrazenou žlutou barvou o maximální šířce (i s rádiusem). Ta se rovná šířce plechu před rohovým zaoblením (rovina je vyobrazena oranžovou barvou a rohové zaoblení je vyobrazeno zelenou barvou).



*Obrázek 29 Návrh na první operaci – „Bublina“*

Jak je zmíněno výše, tak maximální šířka je rovna šířce rovného plechu a tato hodnota nastane ve vzdálenosti 62 mm od začátku vyboulení. V té vzdálenosti dojde k maximální hodnotě hloubky odtokového kanálku. Na závěr je třeba zjistit hloubku nejnižšího místa v bublině. Hodnota hloubky ovlivňuje roztažení materiálu, jelikož je to jediná stavitelná hodnota v místě maximálního protažení.

Pro zjištění maximálního protažení se vypočte hodnota délky hrany v řezu odtokového kanálku v místě maximální hloubky. Řez v tomto místě je načrtnutý a okótovaný na obrázku 30. Z obrázku 30 je celková kóta 274 mm, což je šířka plechu mezi začínajícím zaoblením hrany mycího prostoru (na obrázku 29 vyobrazeny zelenou barvou).

Napojení „bubliny“ na plochu nebude ostré, ale bude nějakou hodnotou zaoblení, proto bude zjištěna hodnota minimálního možného rádiusu pomocí vzorce 4.1

$$R_{min} = \frac{s}{2} \cdot \frac{1-A}{A} = \frac{0,4}{2} \cdot \frac{1-0,45}{0,45} = 0,244 \text{ mm} \quad (4.1)$$

$R_{min}$  – Minimální poloměr ohybu

$s$  – tloušťka materiálu  $s=0,4 \text{ mm}$

$A$  – tažnost materiálu  $A=45\%$

Hodnotu zaoblení u přechodu není vhodné volit tak, aby byla minimální. Čím menší rádius tím větší odpor při vtahování materiálu. Zde může vzniknout místo s velkou napjatostí.



Celkovou délku v řezu zjistíme součtem délek rozděleného řezu

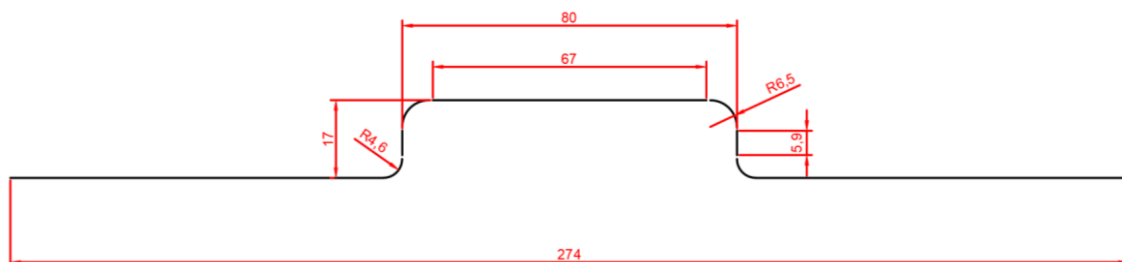
$$L_{max} = 2 \cdot \text{délka okraje} + 2 \cdot \text{délka stěny} + \text{délka vršku} + 2 \cdot \text{délka rádiusů} \quad (4.2)$$

$$L_{max} = [274 - (80 + 2 \cdot 4,6)] + 2 \cdot 5,9 + 67 + 2 \cdot \frac{2\pi \cdot 4,6}{4} + 2 \cdot \frac{2\pi \cdot 6,5}{4}$$

$$L_{max} = [274 - (80 + 2 \cdot 4,6)] + 2 \cdot 5,9 + 67 + \pi \cdot (4,6 + 6,5)$$

$$L_{max} = 298,47 \text{ mm}$$

Plech v daném místě se natáhne z původní délky 274 mm na 298,47 mm.



Obrázek 30 Náčrt řezu odtokového kanálku

Výška H bude zjištěna pomocí programu Autodesk Inventor Professional 2020. V programu je vytvořen model dílu a bude do něj dosazovány hodnoty dle tabulky 3 níže.

Tabulka 3 hodnoty hloubky H pro „bublinu“

H [mm]	L [mm]	ΔL [mm]	%
0	274	0	0
20	276,43	2,43	0,099305
30	281,96	7,96	0,325296
31	282,62	8,62	0,352268
32	283,29	9,29	0,379649
33	283,98	9,98	0,407846
34	284,69	10,69	0,436861
35	285,41	11,41	0,466285
36	286,16	12,16	0,496935
37	286,92	12,92	0,527993
38	287,7	13,7	0,559869
39	288,5	14,5	0,592562
40	289,31	15,31	0,625664
41	290,14	16,14	0,659583
42	290,98	16,98	0,693911
43	291,84	17,84	0,729056
44	292,72	18,72	0,765018
45	293,61	19,61	0,801389
46	294,52	20,52	0,838578
47	295,45	21,45	0,876584
48	296,39	22,39	0,914998
49	297,36	23,36	0,954638
50	298,33	24,33	0,994279
	298,47	24,47	1

Ze zjištěných hodnot je na výběr velké množství hloubek. Hledaná hodnota nesmí být moc blízko konečné hodnotě, protože hodnoty jsou počítány v místě, kde je hloubka největší.

Hodnota H50 je na hranici roztažení materiálu a hrozí, že zde bude přebytek materiálu. Kdyby nastala situace při druhé operaci, že přebytek materiálu v oblasti, by se nemohl přetvarovat nebo bezpečně přesunout do jiné oblasti hrozilo by vysoké riziko zvlnění plechu.

Zvlnění plechu je jedna z poruch při plošném tváření. Dochází k tomu tak, že vznikne rovinné tlakové napětí a materiál se vtahuje do jednoho místa. To vyústí k pokřivení ve tvaru vln. Nastává to například v rozích u obdélníkových hlubokých výtažků nebo u příruby rotačních hlubokých výtažků. I když se vlny na ploše pomocí lisovacích sil stlačí, tak na povrchu zanechává stopy.

Hodnota hloubky bubliny 30 mm z tabulky je moc malá, protože se řez ve stejném místě natáhne jen na 32,5% požadované délky a minimálně se roztahuje tudíž je nevyhovující.

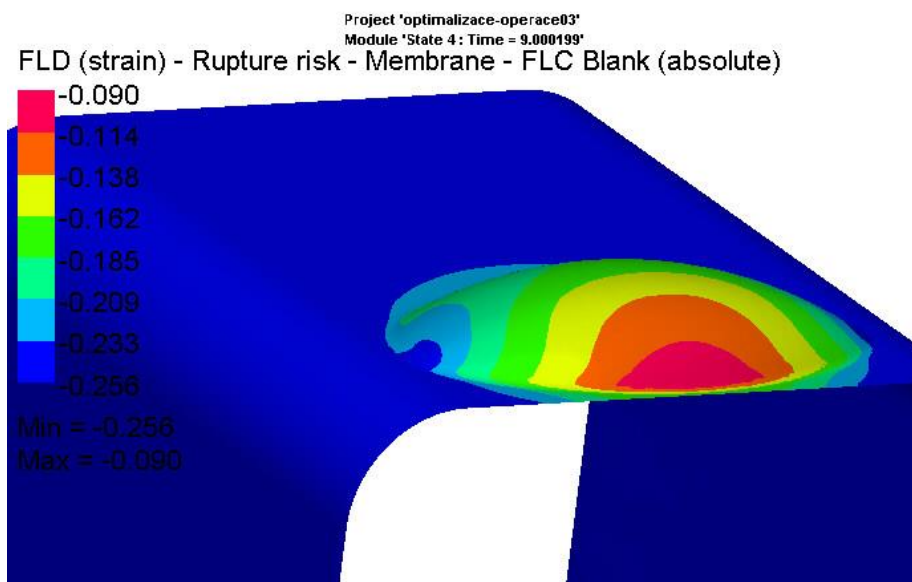
Odhadem je vhodné dosáhnout hodnoty aspoň 60 % požadovaného celkového prodloužení a minimální hloubku. Je zapotřebí nalézt správnou hodnotu v poměru roztažení materiálu v kritickém místě a hloubkou „bubliny“. Problém nastává v uzavření nástroje pro finální operaci. Jelikož je roztahován materiál vybouláním do tvaru bublina a na některých místech bude zapotřebí jej vrátit na původní hodnotu hloubky, tak dojde k lehkému protlačení materiálu zpětným směrem. V tomto případě je předpoklad, že se není třeba obávat zvlnění, protože materiál se bude dál roztahovat a případné vlny vzniklé uzavíráním formy pro druhou operaci se vtáhnou do otvoru, kde bude zapotřebí větší množství materiálu.

Zvolená hodnota je hloubky  $H = 40$  mm, jelikož dosahuje aspoň 62,5 % prodloužení a je nejnižší hloubkou z hodnot nad 60 %.

## **Simulace 1. a 2. operace**

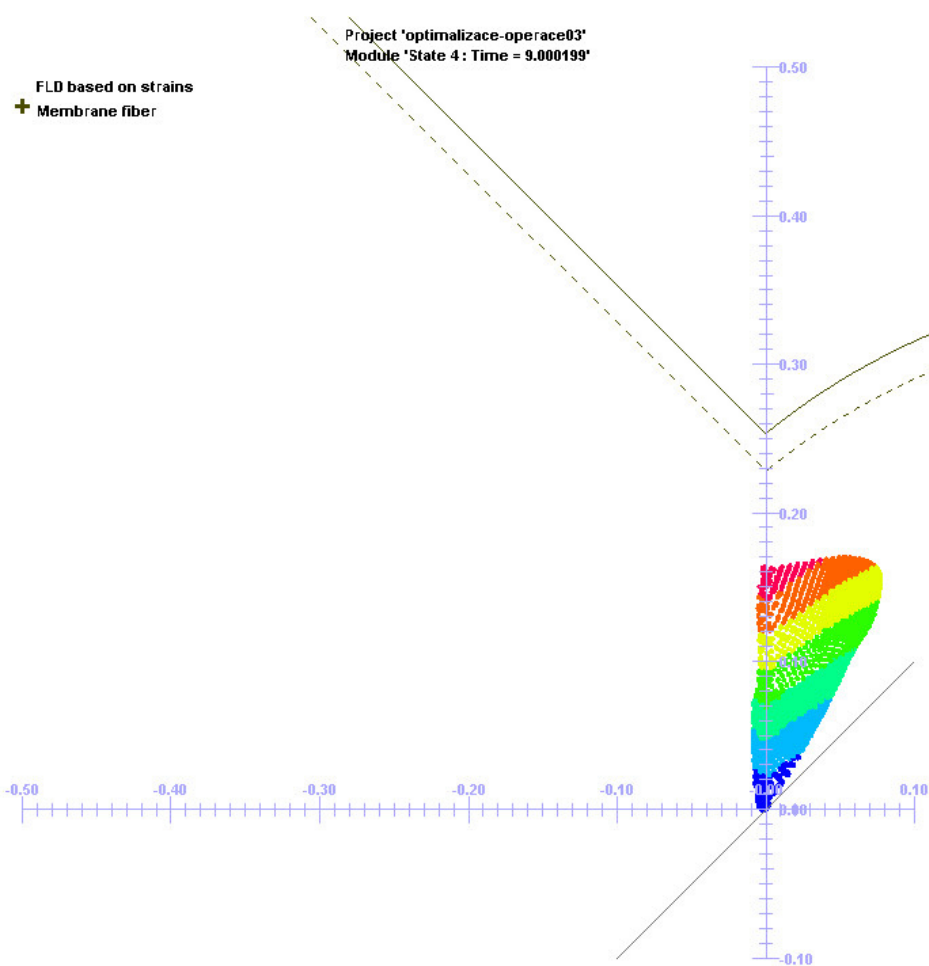
### **1. Operace**

Pro první operaci byla provedena simulace. Výsledky jsou na obrázcích níže. Pro analýzu je zde vyobrazeno riziko prasknutí a k tomu FLD diagram, a také zobrazena přibližná tloušťka stěny.



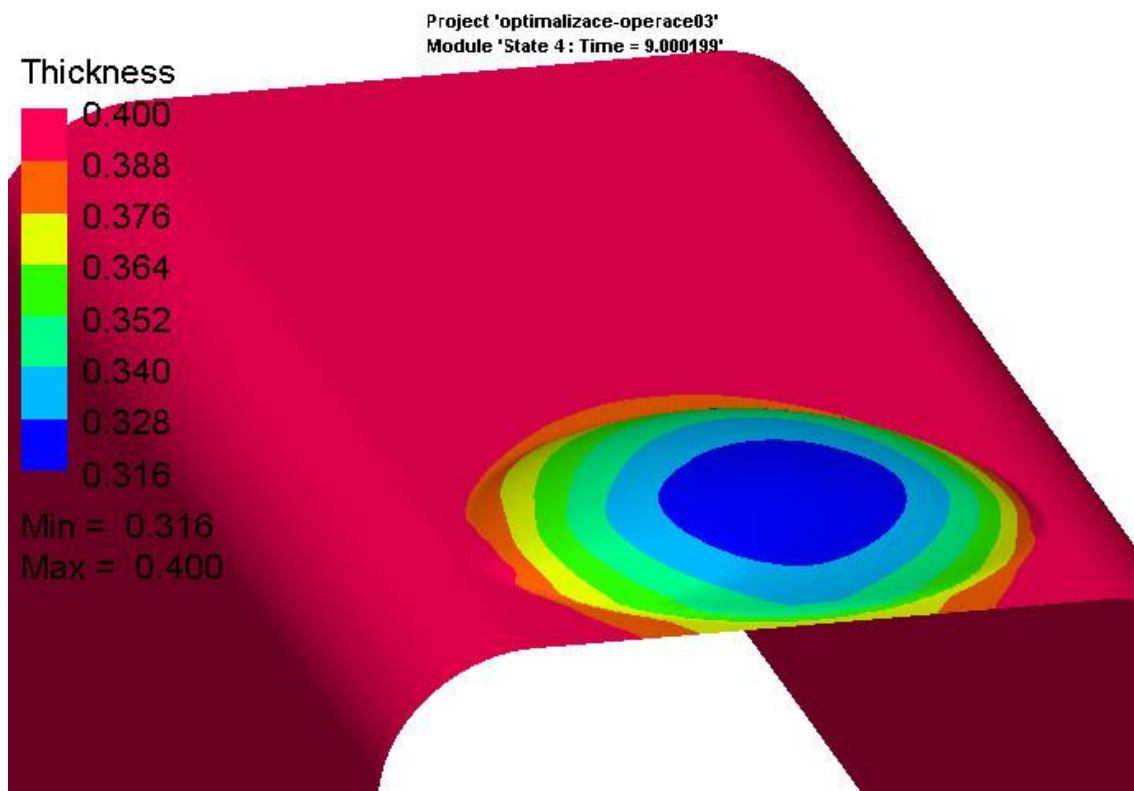
*Obrázek 31 Riziko prasknutí pro první operaci*

Na obrázku 31 je barevný model vyobrazující riziko prasknutí. Na barevné škále jsou hodnoty od -0,256 do hodnoty -0,090. Riziko prasknutí nastává v kladných hodnotách. Pod barevnou stupnicí je hodnota MIN a MAX. Tyto číselné hodnoty jsou extrémy v modelu. Na obrázku 32 jsou hodnoty v bodech vyneseny do FLD diagramu.



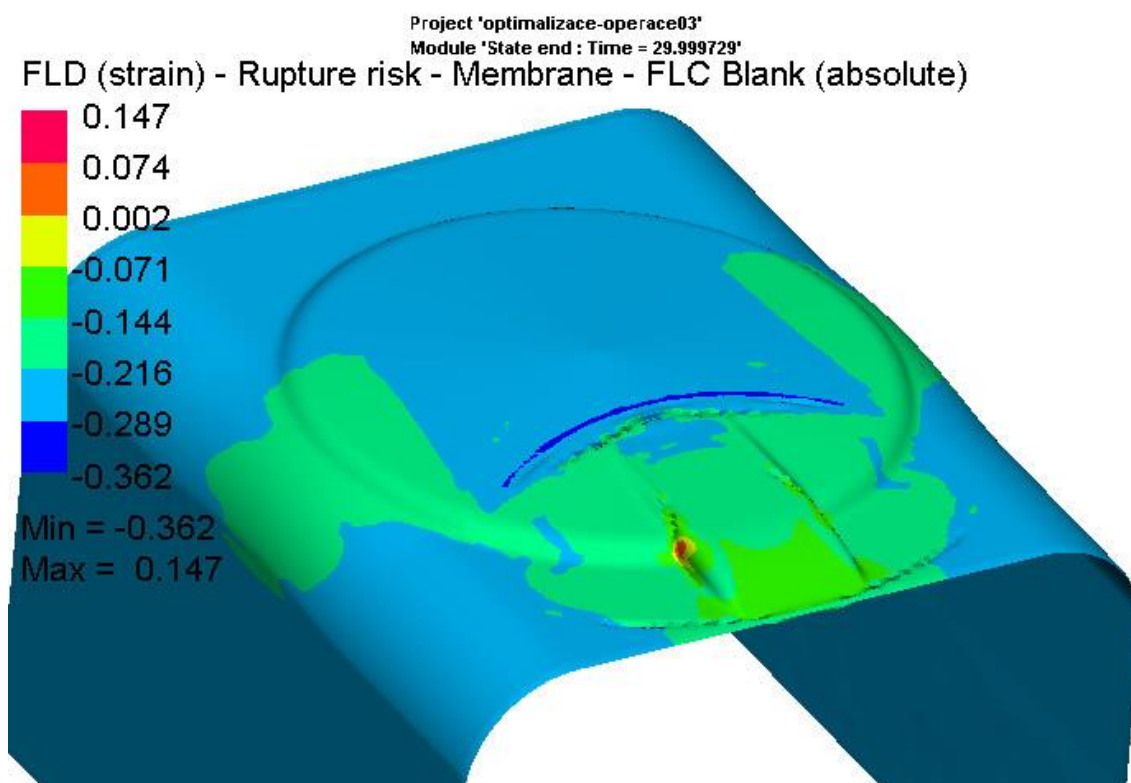
Obrázek 32 FLD diagram pro první operaci

Na obrázku 33 je vyobrazena tloušťka materiálu a dle hodnot jde vidět, že materiál je ztenčen na 0,316 mm v modré oblasti.



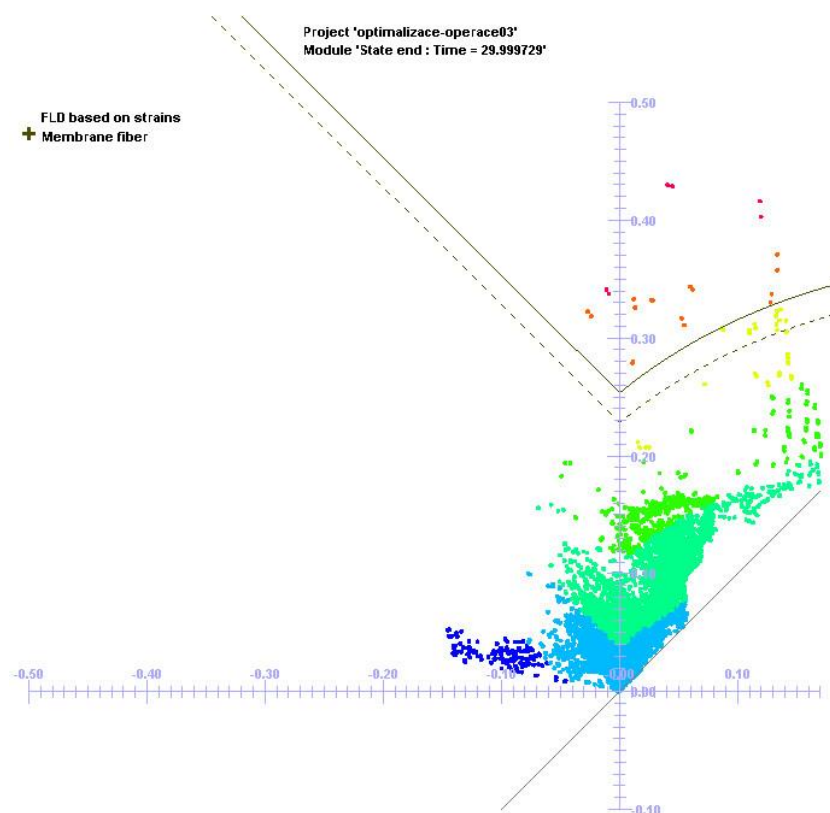
Obrázek 33 Ztenčení plechu v první operaci

## 2. Operace



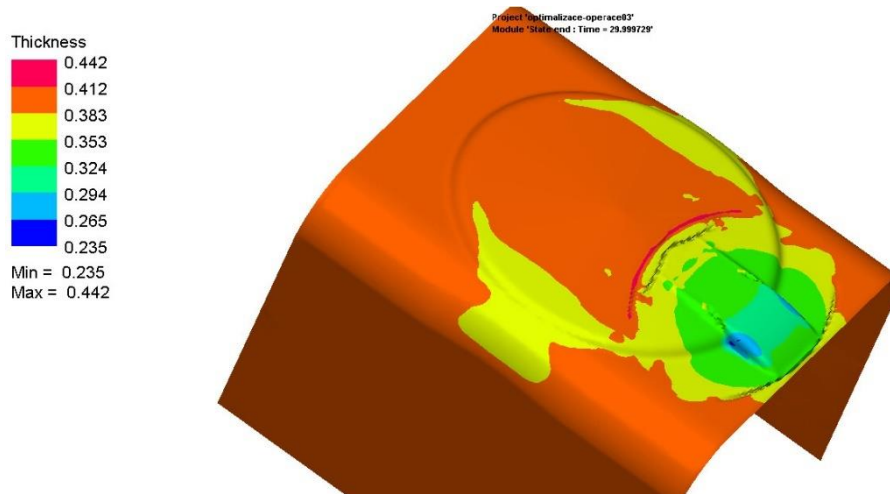
Obrázek 34 Riziko vzniku praskliny po 2 operaci

Na obrázku 34 je vyobrazen výsledek simulace pro druhou operaci. Zde se ukazuje, že oranžová a červená barva je v kladných hodnotách, což znamená že v této oblasti je vysoké riziko vzniku trhliny. Toto tvrzení je potvrzeno na obrázku 35 v FLD diagramu se oranžové a červené body nacházení nad křivkou Keller-Goodwin.



Obrázek 35 FLD diagram pro 2 operaci

Model pro tloušťku plechu navíc ukazuje, že na dvou místech dochází k tlakovému napětí. To je příčinou vzniku zvlnění plechu a zesílení tloušťky materiálu.



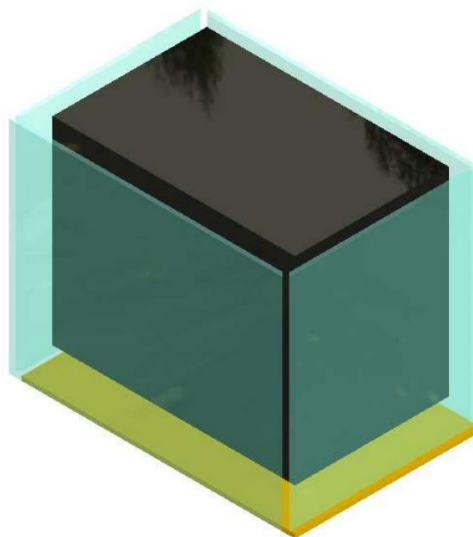
Obrázek 36 Tloušťka plechu po 2. operaci

## 5 VOLBA STROJE

### Základní parametry stroje

Sériově vyráběné stroje pro hydroformování plechů jsou určeny pro výrobu polotovaru z rovného plechu. Toto není vhodné řešení pro tuto problematiku. Celkový výlisek je ve tvaru podobný bedně. Proto je zapotřebí stroj vyrobený na zakázku. Z výroby je známý tvářecí tlak 420 bar, což je rovno 42 MPa. Je zapotřebí výkonná pumpa, která je schopna tohoto tlaku dosáhnout.

Další otázkou je, jak bude vypadat tažnice. Tažnice nesmí být z jednoho kusu, protože by pak následně formovaný výtažek nešel vyndat. Tažnice se tedy bude skládat z pěti dílů. Ze čtyř bočních stěn (na obrázku 37 vyobrazeny modrou průhlednou barvou) a čela (na obrázku 37 vyobrazen žlutou barvou). Vložení a odebrání polotovaru do a ze stroje bude z vrchu tak, že se při tváření uzavře přitlačením čela na vrch.



*Obrázek 37 Spodní pohled na prvky v hydroformovacím stroji*

### Tažení přes membránu nebo napřímo kapalinou

Tváření může probíhat přes membránu nebo kapalina může být v kontaktu přímo s plechem. Výhodou membrány má je, že se výtažek nemusí oplachovat. Nevýhodou membrány je omezená trvanlivost. Tváření bez membrány má výhodu, že případné nečistoty na plechu ze strany nepevného nástroje se nezaryjí do povrchu a není třeba měnit opotřebenou membránu.

Je zvolena možnost bez membrány z několika důvodů:

- Není zapotřebí výměna membrány
- Lepší povrch výtažku
- Přesnější usazení do stroje

### Utěsnění a přívod tvářecí kapaliny

Uzavření bude upevněno za „Hydroformovací blok“ na obrázku 37 je vyobrazen jako černý blok ve středu obklopen částmi tažnice. Tvářecí kapalina se přivede pomocí otvorů v bloku. Těmito otvory se také sníží tlak v soustavě a odčerpá většina kapaliny po tváření. Zbylá kapalina odečte po uvolnění pomocí kanálků do nádrže, odkud se znova načerpá do soustavy. K utěsnění soustavy dojde tak, že se přitlačí volný konec polotovaru na „hydroformovací blok“ pomocí tažnice. Tímto způsobem vznikne i příruba.

### Usazení polotovaru

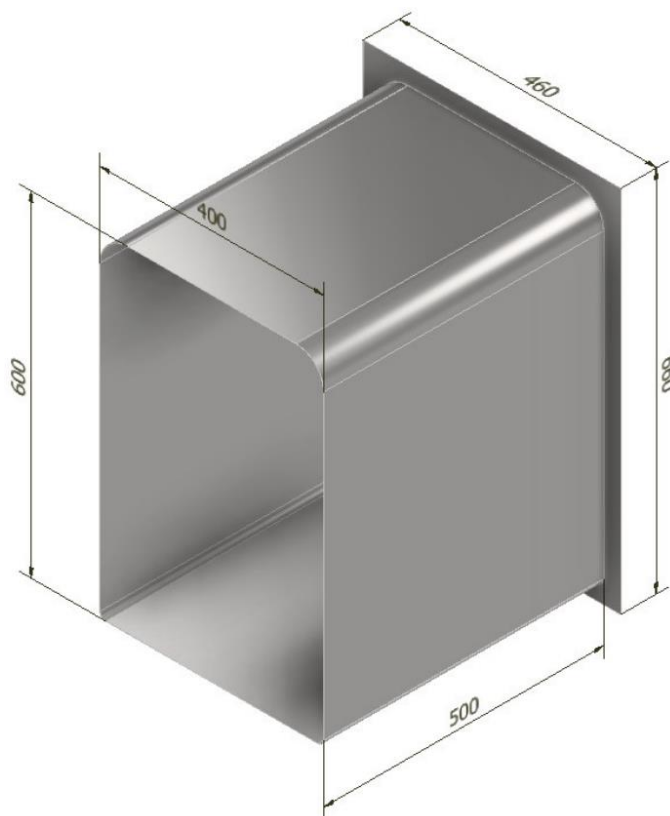
Polotovar se posadí na hydroformovací blok, který je tvarovaný tak, aby se vrchní hrana hydroformovacího bloku dotkla vnitřního rohu svaru na polotovaru. Těmito body bude zajištěná přesná poloha polotovaru v nástroji.

## 6 TECHNOLOGICKÝ POSTUP

Technologický postup výroby mycího prostoru se skládá ze 3 operací a mezioperace. První operace je svařování polotovaru, následuje operace tváření (hydroforming). Mezioperace opláchnutí a omytí výtažku. Závěrečná operace řezání otvorů pomocí laseru.

### 1. Operace svařování plechů

Jako vstupní materiály jsou dva plechy menší 660 x 460 x 0,4 mm a větší plech 1868,5 x 500 x 0,4 mm. Větší plech je pozohýbán po delší straně do obdélníku o rozměrech 400x600 s rohy se zaoblením R50 a R10 mm. Zaoblení je stejné na stranách délky 400, tak jak je vyobrazeno na obrázku 32. Následně je pomocí odporového svařování navařen na menší plech jako čelo.

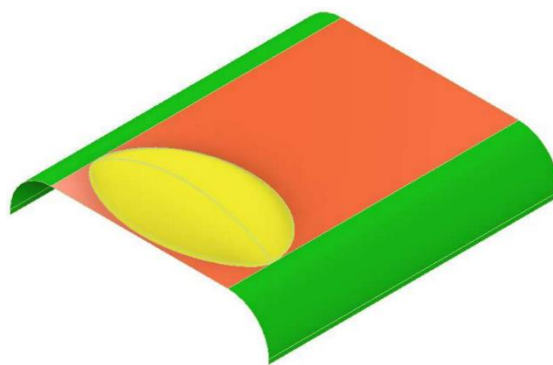
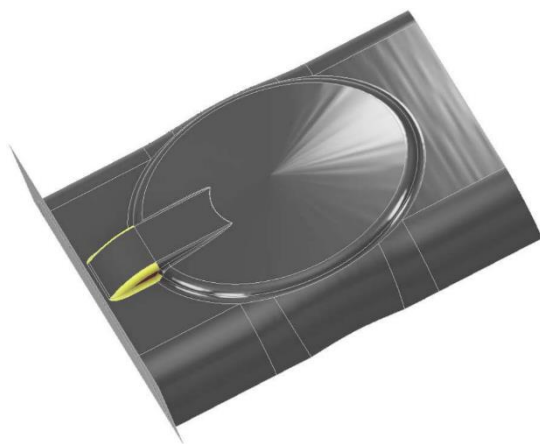


*Obrázek 38 Svařený polotovar po operaci svařování*

### 2. Operace hydroformování

Tato fáze je rozdělena na dvě operace hydroformování, které jsou řešeny v předchozí kapitole. Výsledkem je forma pro obě operace, díky kterým mělo být možno eliminovat nebo snížit počet vyrobených dílů se vznikem praskliny v kritickém místě. Obě matrice pro simulaci jsou vyobrazeny na obrázcích 39 a 40.





*Obrázek 39 Tvar matrice pro první operaci*

*Obrázek 40 Tvar matrice pro finální operaci*

### **Mezioperace**

V mezioperaci se výtažek očistí od mastnot a od tvářecí kapaliny pomocí kyseliny.

### **3. Operace řezání laserem**

Technologie řezání laserem je pro tento typ výroby ideální. Jedná se o poměrně komplikovaný tvar

### **Montáž**

Po závěrečné operaci se díl dopraví na montáž, kde se vmontuje do myčky.

### **Kontrola**

Kontroly jsou prováděny pohledově u každého dílu a jeden díl ze sekvence 24 ks je odvezen na kompletní kontrolu rozměrů.

Kontrola je provedena i samotnou montáží výrobku. Nevýhodou této kontroly je, že při zjištění závady je odstaveno více dílů a zkoumá se celá sestava, což je časově náročnější.

## **7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ**

Metoda hydroformování je z ekonomického hlediska zajímavá. V tomto konkrétním případě není zapotřebí konvenčního tažníku, který je velice nákladný, také není zapotřebí složitý tvářecí nástroj.

Nevýhodou jsou rozměry stroje. Jsou relativně velké, vyplývající z potřeby utěsnění tvářecí části. Nepřispívá k tomu ani konstrukce tažnice. Celou tažnici je potřeba napojit na ovládací systém, který přisune a utěsní všechny části tažnice na pracovní pozici a zpět. Celý tento postup je časově náročný, což snižuje produktivitu.

Řešení tváření už svařeného dílu je výhodné v tom, že výroba je daleko přesnější (nesvařují se pomačkané plechy, ale přímo rovné na začátku procesu). Toto řešení snižuje počet operací, časovou a energetickou náročnost a nevyčerpává tolik lidských zdrojů, které je potřeba kvalifikovat a mohou se přesunout na jinou pracovní pozici.

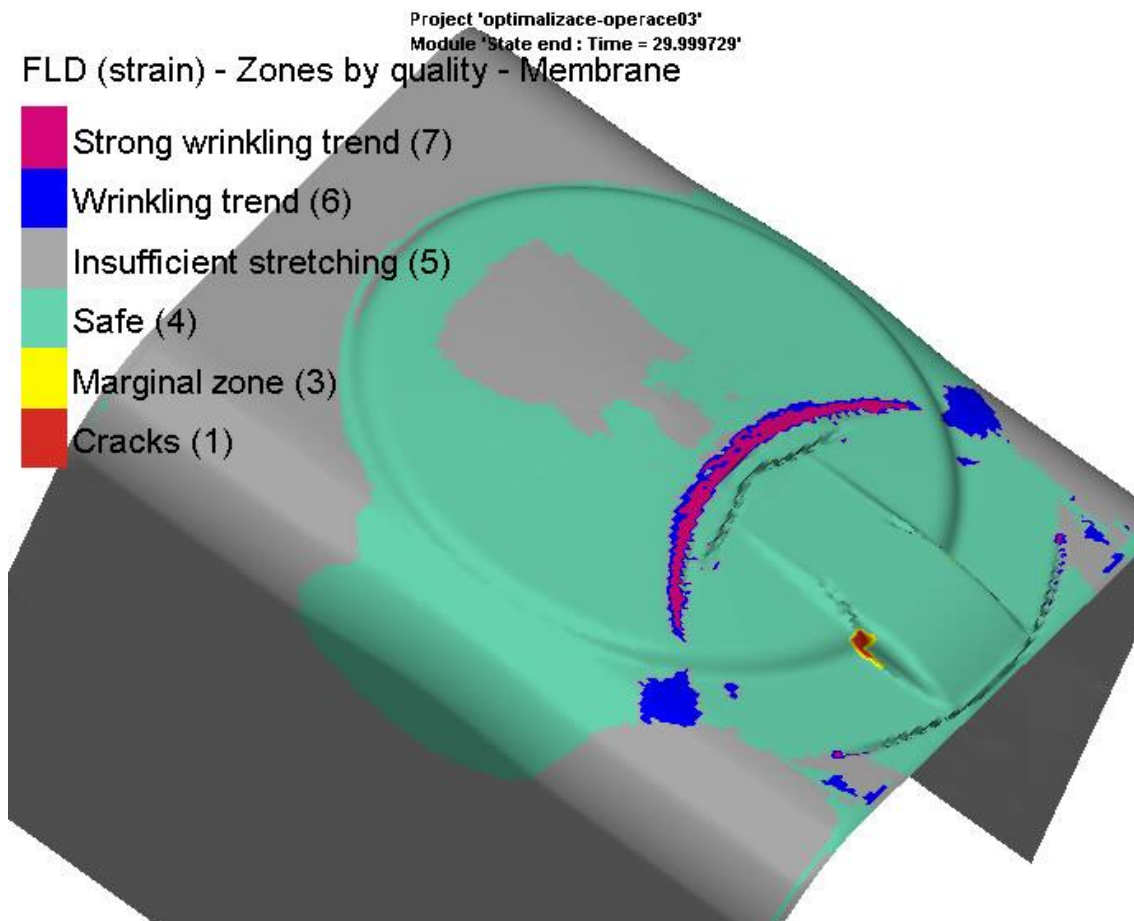
Konkrétní ceny firma nezveřejňuje.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo poukázat na problematiku kritického zúžení stěny při tváření kapalinou na příkladu z praxe. Zvolená strategie víceoperačního tažení se zvolenou první operací se ukázala jako nevhodné řešení problematiky ze dvou důvodů.

První nedostatek je nahrnutí materiálu do jedné oblasti – vznik zvrásnění (na obrázku 41 vyobrazen modrou barvou) a zvlnění (vyobrazeno fialovou barvou).

Druhý nedostatek je vznik míst s extrémním plošným tahovým namáháním – vznik kritických míst (vyobrazeno žlutě) s prasklinami (vyobrazeno červenou).



*Obrázek 41 kvalita výtažku po 2 operaci*

Důvodem kritického zúžení stěny je upevnění konce plechu. Důsledkem je ztenčení tloušťky materiálu. Simulace druhé operace ukázala, že materiál se tak dobře nevtahuje do volných míst v tažnici pro finální tvar. Vzniká zvrásnění a následné vlny. V kritickém místě se navíc už předejatý vrchol bubliny „zachytí“ o počínající rádiusy odtokového kanálku a materiál se ztenčuje v oblasti podobné velikosti jako ze simulace původního stavu na stejném místě z obrázku 27.

Na závěr je třeba dodat, že řešení víceoperačního tažení není vhodné kvůli komplikacím doprovázejících výrobu. Nicméně je třeba dodat, že tento typ řešení není nemožný.

## Zdroje

- [1] Intran. Intran [online]. Morelos Mexico: Intran, 2020 [cit. 2021-02-21]. Dostupné z: <https://www.intran.mx/what-is-tube-hydroforming/>
- [2] Bresslergroup. Sheet hydroforming. In: *Pinterest* [online]. Philadelphia: Bresslergroup, 2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/12525705188805580/>
- [3] CHRZ, Jan. Výroba dílce hydroformováním a její optimalizace [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124298>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.
- [4] Materiálový list DIN 1.4301 [online]. Evropská 423/178 Praha 6: Dashöfer Holding, 2020 [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnl00RA9x7p75N8MGgz73w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLnl00RA9x7p75N8MGgz73w)
- [5] ŘIHÁČEK, Jan. Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu. Brno, 2017. 109s, 10 příloh. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- [6] HARANT, Martin. Výroba dílce hydroformováním a její optimalizace. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117145>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.
- [7] BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
- [8] ŘÁDA, A. Moderní postupy a technologie tváření plechových dílů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 35 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Milan Dvořák, CSc.
- [9] Fries Petr. Plošné tváření pomocí kapaliny. Brno, 2014. 28 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Jan Řiháček
- [10] LI, Yaning, Meng LUO, Jörg GERLACH a Tomasz WIERZBICKI. Prediction of shear-induced fracture in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, **210**(14), 1858-1869. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.06.021
- [11] Houževnatost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hou%C5%BEEvnatost>
- [12] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [13] JANDA, Luděk. Tahová zkouška trubek. Brno, 2015. 55s, 2 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav

strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva PETERKOVÁ Ph.D.

- [14] *Napjatost - houževnatý materiál* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2020 [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.kme.zcu.cz/kmet/pp/napjatost-a-hypotezy-pevnosti/napjatost.php?action=add>
- [15] GRUFÍK, Lubomír. Deformační sítě a jejich využití v technologii tváření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 28 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Šmehlíková, Ph.D.
- [16] Schéma napjatosti a deformace. In: *TUL FS* [online]. Liberec: TUL FS, 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm)
- [17] *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. 2021. ISSN 0924-0136.
- [18] *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, 2021 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hydromechanicke-tvareni-vnejsim-vodnim-pretlakem>
- [19] SVOBODA, Petr. *Mechanické vlastnosti rybářských vlasců*. Zlín, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. František Rulík, CSc.
- [20] SMRŽ Peter: Diagramy tvařitelnosti a jejich využití v praxi. Brno, 2011. 31 s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Obor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D..
- [21] LESÁK, Ladislav. *Numerická simulace deformace materiálu v oblasti mezních přetvoření*. Liberec, 2012. Diplomová práce. TUL-FS. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [22] LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.

## Seznam použitých symbolů a zkratek

C	Uhlík	
Cr	Chrom	
Ni	Nikl	
Mn	Mangan	
Si	Křemík	
P	Fosfor	
S	Síra	
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,1}$	Mez kluzu při hodnotě 0,1% prodloužení	[MPa]
$R_{p0,2}$	Mez kluzu při hodnotě 0,2% prodloužení	[MPa]
Z	Kontrakce	[%]
A	Tažnost materiálu	[%]
HMT	Hydromechanické tažení	
VW	Volkswagen	
BMW	Bayerische Motoren Werke AG	
KTM	KTM Sportmotorcykl AG	
r	Koeficient plastické anizotropie	[-]
$r_\alpha$	koeficient plastické anizotropie vzorku vyřezaným pod úhlem $\alpha$	[-]
$r_{stř}$	je střední hodnota koeficientu plastické anizotropie	[-]
$\sigma$	Napětí	[MPa]
n	Exponent deformačního zpevnění	[-]
L	Původní délka vzorku	[mm]
$L_u$	Délka vzorku po deformaci	[mm]
$\varphi_b$	Logaritmické přetvoření šířky vzorku	[-]
$b_0$	Původní šířka vzorku	[mm]
b	Šířka vzorku po přetvoření	[mm]
$\varphi_h$	Logaritmické přetvoření šířky vzorku	[-]
$s_0$	Původní průřez vzorku	[mm]
s	Průřez vzorku po přetvoření	[mm]
$\beta$	úhel svírající křivka s osou $\log\phi$	[-]
$\sigma_{A,B}$	napětí v materiálu v bodech A a B	[-]
$\varphi_{A,B}$	Přetvoření materiálu v bodech A a B	[-]
$\alpha$	ukazatel stavu napjatosti	[-]
$\sigma_{1,2}$	Rovinná napětí, které jsou na sebe navzájem kolmá	[MPa]
$\epsilon_{tah}$	Poměrné přetvoření pro tah	[-]
$\epsilon_{tlak}$	Poměrné přetvoření pro tlak	[-]
d	původní průměr kružnice před přetvořením	[mm]
$L_{1,2}$	délka hlavní a vedlejší poloosy elipsy po přetvoření	[mm]
$R_{min}$	Minimální poloměr ohybu	[mm]
s	tloušťka materiálu	[mm]
H	Hloubka bubliny	[mm]
$\Delta L$	Rozdíl délky plechu a řezu optimalizovaným dílem	[mm]

## **Seznam příloh**

Materiálový list DIN 1.4301

Výkresy: 1-200611-21052021 Tažnice 1 op.

2-200611-21052021 Tažnice 2 op.

3-200611-21052021 Výřez

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Příklad výrobků tvářených kapalinou [1][2] .....	9
Obrázek 2 Řešená oblast.....	10
Obrázek 3 Zkoumaná oblast .....	11
Obrázek 4 Odstranění odtokového kanálku .....	11
Obrázek 5 Zvětšení rádiusu .....	12
Obrázek 6 Schéma napjatosti .....	12
Obrázek 7 Víceoperační tažení.....	13
Obrázek 8 Hydroformování dvou plechů [17] .....	14
Obrázek 9 Druhy Hydroformování [5].....	15
Obrázek 10 Nákres metody Hydroform [8].....	16
Obrázek 11 Nákres metody Wheelon [8] .....	17
Obrázek 12 Metoda Flexform s kroky [9] .....	18
Obrázek 13 Druhá a třetí fáze HMT [8] .....	19
Obrázek 14 Vzorky k určení plošné anizotropie [21].....	21
Obrázek 15 Princip dvoubodové metody určení exponentu n.....	22
Obrázek 16 Složky napětí [14] .....	23
Obrázek 17 Schéma napjatosti .....	24
Obrázek 18 Zkušební vzorky a) kruhový vzorek; b) obdélníkový vzorek; c) vzorek vyřezávaný z trubky [13] .....	25
Obrázek 19 Schéma zkušebního stroje [13] .....	25
Obrázek 20 Graf s nevýraznou mezí kluzu [19].....	26
Obrázek 21 Graf s výraznou mezí kluzu [11].....	26
Obrázek 22 Přehled nejpoužívanějších vzorů [15].....	27
Obrázek 23 Ukázka deformace sítě [15] .....	27
Obrázek 24 Odečtení hodnot z kružnice [15].....	27
Obrázek 25 Diagram Keller-Goodwin [20] .....	28
Obrázek 26 Oblast z praxe.....	29
Obrázek 27 Simulace výchozího stavu.....	30
Obrázek 28 FLD diagram simulace současného stavu.....	31
Obrázek 29 Návrh na první operaci – „Bublina“ .....	32
Obrázek 30 Náčrt řezu odtokového kanálku .....	33
Obrázek 31 Riziko prasknutí pro první operaci.....	35
Obrázek 32 FLD diagram pro první operaci .....	36
Obrázek 33 Ztenčení plechu v první operaci.....	37
Obrázek 34 Riziko vzniku praskliny po 2 operaci .....	37
Obrázek 35 FLD diagram pro 2 operaci.....	38
Obrázek 36 Tloušťka plechu po 2. operaci.....	38
Obrázek 37 Spodní pohled na prvky v hydroformovacím stroji .....	39
Obrázek 38 Svařený polotovár po operaci svařování .....	40
Obrázek 39 Tvar matrice pro první operaci.....	41
Obrázek 40 Tvar matrice pro finální operaci.....	41
Obrázek 41 Qualita výtažku po 2 operaci .....	43



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení oceli DIN 1.4301 [4].....	10
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti oceli DIN 1.4301 [4] .....	11
Tabulka 3 hodnoty hloubky H pro „bublinu“ .....	33

1.4301

Číselné označení

Cr-Ni austenitická  
ocel odolná korozi

X5CrNi18-10

Značka

Chemické složení [hm. %]<sup>7)</sup>

C	Si	Mn	P	S <sup>1)</sup>	Cr	Ni	N <sup>8)</sup>
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,5–19,5	8,00–10,5	max 0,11

Normy EN

[1] 10088-1,-2, -3	[6] 10222-5	[11] 10270-3	[16] 10312
[2] 10028-7	[7] 10250-4	[12] 10272	[17] 10088-4,-5
[3] 10151	[8] 10263-5	[13] 10294-2	
[4] 10216-5	[9] 10264-4	[14] 10296-2	
[5] 10217-7	[10] 10269	[15] 10297-2	

Mechanické vlastnosti

Polotovár, norma		C <sup>2)</sup> [1][2][17]	H <sup>3)</sup> [1][2][17]	P <sup>4)</sup> [1][2][17]	T <sup>5)</sup> [1][12][17]	
Rozměr t, d [mm]		≤ 8	≤ 13,5	≤ 75	≤ 160 >160 ≤ 250	
Stav		po rozpouštěcím žhání (+AT)				
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa] min		230	210		190	
Mez kluzu R <sub>p1,0</sub> [MPa] min		260	250		225	
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		540–750	520–720		500–700	
Tažnost A [%]	podél min	–			45	–
	příčně min	45			–	35
Nárazová práce KV [J]		podél min	–	100	100	–
		příčně min	–	60	–	60
KV <sup>-196</sup> [J]		příčně min	–	60	–	–



Polotovár, norma	drát na lana [9]				
Rozměr d [mm]	≤ 0,20	>0,40 ≤ 0,50	>0,80 ≤ 1,00	>1,75 ≤ 2,00	>2,50 ≤ 3,00
Stav	–				
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min	–	–	–	–	–
Mez pevnosti $R_m$ [MPa] min	2050	1900	1750	1550	1450
Tažnost A [%]	–	–	–	–	–
Kontrakce Z [%]	–	–	–	–	–

Polotovár, norma	drát na pružiny [11]				
Rozměr d [mm]	≤ 0,20	>1,00 ≤ 1,25	>2,00 ≤ 2,50	>4,25 ≤ 5,00	>8,50 ≤ 10,00
Stav	tažený za studena (+C)				
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	–	–	–	–	–
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	2000–2150	1725–1750	1525–1550	1350–1400	1175–1250
Tažnost A [%]	–	–	–	–	–
Kontrakce Z [%]	–	–	–	–	–

## Mechanické vlastnosti za zvýšených/snížených teplot

Min. hodnoty meze kluzu  $R_{p0,2}$  a  $R_{p1,0}$  a meze pevnosti  $R_m$  při zvýšených teplotách (stav +AT)

Teplota [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	
Mez kluzu [MPa]	R <sub>p0,2</sub>	157	142	127	118	110	104	98	95	92	90
	R <sub>p1,0</sub>	191	172	157	145	135	129	125	122	120	120
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		450	420	400	390	380	380	380	370	360	330

Hodnoty modulu pružnosti E při normální a zvýšených teplotách

Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500
Modul pružnosti E [GPa]	200	194	186	179	172	165

Min. mechanické vlastnosti při snížených teplotách (norma [2])

Teplota [°C]	20	-80	-150	-196
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	210	270	315	300
Mez kluzu $R_{p1,0}$ [MPa]	250	350	415	400
Pevnost $R_m$ [MPa]	520	860	1100	1250
Tažnost A [%]	45	35	30	30t

## Fyzikální vlastnosti

Hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Elektrický odpor při 20 °C [Ω.mm <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup> ]
7900	500	18,0·10 <sup>-6</sup> (20–500 °C)	15	0,73

## Odolnost degradačním procesům

Odolnost mezikrystalové korozi  
– v dodávaném stavu: ano  
– po zcitlivění: ne

## Dosažitelné hodnoty pevnosti v tahu (+C) a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (+CP) ve stavu za studena zpevněném (2H)

+ C 700 ( $R_m = 700\text{--}850$  MPa)  
+ C 850 ( $R_m = 850\text{--}1000$  MPa)  
+ C 1000 ( $R_m = 1000\text{--}1150$  MPa)  
+ CP 350 ( $R_{p0,2} = 350\text{--}500$  MPa)  
+ CP 500 ( $R_{p0,2} = 500\text{--}700$  MPa)  
+ CP700 ( $R_{p0,2} = 700\text{--}900$  MPa)

## Tepelné zpracování

Rozpouštěcí žhání 1000–1100 °C      ochlazovat ve vodě nebo rychle na vzduchu

### Zpracování pružin

Válcovaný za studena + popuštění 250 °C / 24 h až 450 °C / 30 min – ochlazovat na vzduchu

## Tváření za tepla

1200–900 °C      ochlazovat na vzduchu

## Obrábění

Požadované řezné rychlosti podle normy [13]

– obrábění na hrubo 190 m/min  
– obrábění na jemno 240 m/min

## Ostatní vlastnosti

Nemagnetovatelná ocel běžné jakosti

## Použití

Pro obecné použití v korozním prostředí. Různé součásti např. v potravinářském průmyslu (ocel je svařitelná, dobře leštitelná, zvláště hlubokotažná, odolná proti opotřebení).

# Porovnání se zahraničními materiály

EURO		Česká republika		Německo	
X5CrNi18-10	EN 10088	17 240	ČSN 41 7240	X5CrNi18-10	DIN 17440
Francie		Velká Británie		Itálie	
Z6CN18-09	NF A36-209	304S15	BS 970-1	–	–
ISO		USA		Rusko	
X5CrNi18-10	ISO 6931-2	304	ASTM A167	08Ch18N10	GOST 5632
Japonsko		Čína		–	
SUS 304	JIS G3448	0Ch18N9	GB 4239	–	–

## Poznámky

- <sup>1)</sup> Pro tyče, dráty, profily, lesklé výrobky a odpovídající polotovary platí max. obsah S 0,030 %. Jednotlivé rozsahy obsahu S poskytují možnost zlepšení určitých vlastností. Pro výrobky určené k obrábění je doporučen a povolen obsah S = 0,015–0,030 %, pro svařitelnost řízený obsah S = 0,008–0,030 %, pro lešitelnost obsah S = max 0,015 %
- <sup>2)</sup> C – za studena válcovaný pás
- <sup>3)</sup> H – za tepla válcovaný pás
- <sup>4)</sup> P – za tepla válcovaný plech
- <sup>5)</sup> T – tyče, dráty, tvarová ocel, lesklé výrobky
- <sup>6)</sup> Ve stupních + C700 ( $R_m = 700\text{--}850\text{ MPa}$ , A = min 25 %), + C850 ( $R_m = 850\text{--}1000\text{ MPa}$ , A = min 12 %), + C 1000 ( $R_m = 1000\text{--}1150\text{ MPa}$ , A = min 5 %), + C1150 ( $R_m = 1150\text{--}1300\text{ MPa}$ , A = min 3 %), + C1300 ( $R_m = 1300\text{--}1500\text{ MPa}$ , A = min 1 %)
- <sup>7)</sup> Odchytky od uvedeného chemického složení v následujících normách:
- [4] – P = max 0,040 %,
  - [7], [8], [10], [11] – S = max 0,030 %,
  - [8] – Cu = max 1,00 %
  - [9], [13] – Cr = 17,0–19,5
- <sup>8)</sup> Podle [2], [12] a [17] N = max 0,10 %